

Institut für Energie- und Klimaforschung
Plasmaphysik (IEK-4)

Entwicklung und Test von Prototypkomponenten für ITER

*Wolfgang Biel, Wilfried Behr, David Castano-Bardawil,
Guntram Czymek, Sebastian Frieze, Niels Gierse,
Alexander Huber, Hans-Rudolf Koslowski, Yuri Krasikov,
Andreas Krimmer, Michael Lehnen, Andrey Litnovsky,
Oleksandr Marchuk, Philippe Mertens, Olaf Neubauer,
Guido Offermanns, Anatoli Panin, Michael Schrader,
Bernd Schweer, Gennadi Sergienko, Bernhard Unterberg*

Entwicklung und Test von Prototypkomponenten für ITER

*Wolfgang Biel, Wilfried Behr, David Castano-Bardawil,
Guntram Czymek, Sebastian Frieze, Niels Gierse,
Alexander Huber, Hans-Rudolf Koslowski, Yuri Krasikov,
Andreas Krimmer, Michael Lehnen, Andrey Litnovsky,
Oleksandr Marchuk, Philippe Mertens, Olaf Neubauer,
Guido Offermanns, Anatoli Panin, Michael Schrader,
Bernd Schweer, Gennadi Sergienko, Bernhard Unterberg*

Berichte des Forschungszentrums Jülich; 4391
ISSN 0944-2952
Institut für Energie- und Klimaforschung
Plasmaphysik (IEK-4)
Jül-4391

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess

Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek, Verlag
52425 Jülich
Tel.: +49 2461 61-5220
Fax: +49 2461 61-6103
E-Mail: zb-publication@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/zb

ENTWICKLUNG UND TEST VON PROTOTYPKOMPONENTEN FÜR ITER

Wolfgang Biel, Wilfried Behr, David Castano-Bardawil, Guntram Czymek, Sebastian Frieze, Niels Gierse, Alexander Huber, Hans-Rudolf Koslowski, Yuri Krasikov, Andreas Krimmer, Michael Lehen, Andrey Litnovsky, Oleksandr Marchuk, Philippe Mertens, Olaf Neubauer, Guido Offermanns, Anatoli Panin, Michael Schrader, Bernd Schweer, Gennadi Sergienko, Bernhard Unterberg

Forschungszentrum Jülich GmbH
D-52425 Jülich

Forschungsvorhaben 03FUS0007

Schlussbericht für die Projektlaufzeit vom 01.10.2008 bis 31.12.2014

GEFÖRDERT VOM

Projektleiter:

Prof. Dr. Wolfgang Biel
Institut für Energie- und Klimaforschung - Plasmaphysik
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Hinweis:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FUS0007 gefördert. Die Verantwortung für die Veröffentlichung liegt beim Autor.

Einleitung und Übersicht:

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) stellte in 2007/2008 Mittel im Rahmen der Projektförderung zur Verfügung, mit der Zielsetzung eine stärker sichtbare Beteiligung der deutschen Fusionsinstitute am Aufbau von ITER zu erreichen, sowie die Chancen deutscher Unternehmen auf die Übernahme von Aufträgen für den Aufbau von ITER zu stärken.

Eine wichtige Zielsetzung des hier beschriebenen Forschungsvorhabens (Projektnummer 03FUS0007) war es demnach, kritische Prototyp-Komponenten für ITER zu entwickeln und zu testen, sowie entsprechende Mess- und Prüfeinrichtungen aufzubauen. Gleichzeitig wurde in der Projektbearbeitung sehr eng mit einer ganzen Reihe von Unternehmen zusammengearbeitet, um so einen intensiven Know-How Transfer in beiden Richtungen im Hinblick auf die Entwicklung von Komponenten für Fusionsanlagen zu erreichen.

Das wissenschaftliche Programm des Vorhabens gliedert sich in folgende Teilprojekte:

1. ITER Diagnostik Port Plug zur Ladungsaustausch-Spektroskopie (CXRS), mit den Unterthemen:
 - a. Entwicklung von Prototypen für kritische mechanische Komponenten
 - b. Entwicklung eines Roboters für das Laser-Schweißen von Vakuumdichtungen und Rohrleitungen am Port Plug
 - c. Spiegeluntersuchungen
 - d. CXRS Prototyp Spektrometer
2. ITER Tritium-Retention Diagnostik (TR)
3. ITER Disruption Mitigation Ventil (DMV)

Die Laufzeit des Projektes war laut Bewilligungsbescheid ursprünglich auf den Zeitraum 01.10.2008 bis 31.12.2012 terminiert und wurde durch kostenneutrale Laufzeitverlängerungen zweimal um je ein Jahr bis zum abschließenden Projektende am 31.12.2014 verlängert. Ferner wurde dem Projektträger in 2013 ein Plan für die abschließenden Arbeiten im Projekt einschließlich eines Umwidmungsantrages vorgelegt und bewilligt.

Die Schlussberichte (Sachberichte) zu den einzelnen Teilprojekten bzw. Unterthemen sind im Folgenden angefügt. Die Arbeiten zum Unterthema „ITER Tritium-Retention Diagnostik (TR)“ werden im Rahmen eines Nachfolgeprojektes (03FUS0020) noch bis Januar 2016 fortgeführt.

Schlussbericht (Sachbericht) zum Teilvorhaben:

“ITER Diagnostik Port Plug zur Ladungsaustausch-Spektroskopie (CXRS)”

I Einleitung

Die Entwicklung und der Aufbau des weltweit größten Fusionsexperiments ITER als Meilenstein zur kommerziellen Nutzung der kontrollierten Kernfusion stellt seit vielen Jahren die zentrale Aufgabe für die an der Fusionsforschung beteiligten Institute in Deutschland und weltweit dar. In Jülich wurde seit 2006 gezielt ein Team von Ingenieuren und Physikern aufgebaut, um signifikante Arbeitspakete aus den Themenfeldern der eigenen Expertise zum Aufbau von ITER zu übernehmen. Das größte Einzelthema, in dem Jülich im Rahmen eines europäischen Konsortiums eine führende Rolle übernimmt, ist die Entwicklung der ITER CXRS Diagnostik. Im Rahmen des Forschungsvorhabens 03FUS0007 wurden hierzu

- das Jülicher Projektteam gezielt in die Aufgabenstellung eingearbeitet,
- relevante Mess- und Prüfeinrichtungen aufgebaut,
- umfassende vorbereitende Entwicklungsarbeiten für Prototypen durchgeführt,
- umfangreiche F&E Aufträge an Industriefirmen vergeben, mit fachlicher Betreuung durch das FZJ Projektteam, bei denen sich die Industriefirmen ITER-relevantes Know-How aneignen konnten.

Auf Basis dieser Arbeiten konnte das Jülicher Projektteam als Koordinator eines europäischen Konsortiums in 2014 einen großen Forschungsauftrag („Framework Partnership Agreement“) seitens Fusion for Energy (F4E) zur Entwicklung der ITER CXRS Diagnostik einwerben, und unter diesem Rahmenvertrag konnte in 2015 ein erster großer Einzelauftrag für Entwicklungsarbeiten für das ITER CXRS System unterschrieben werden. Weiterhin konnte auch eine Reihe derjenigen Industriefirmen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens F&E Aufträge bearbeitet haben, inzwischen Aufträge zum Aufbau von ITER einwerben. Damit wurden die wesentlichen durch das BMBF vorgegebenen Ziele der Projektförderung Fusion erreicht.

An den Arbeiten zur ITER CXRS Diagnostik sind zum Zeitpunkt dieses Berichtes neben dem Konsortialführer FZJ auch Arbeitsgruppen bei KIT (Karlsruhe), BME (Ungarn), FOM-DIFFER (NL), TU Eindhoven (NL) und CCFE (UK) beteiligt. Im Rahmen der Aufgabenteilung innerhalb dieser Kooperation arbeitet Jülich an den drei Schwerpunktthemen

- Entwicklung mechanischer Komponenten im ITER CXRS Port Plug
- Untersuchungen zur Optimierung der Lebensdauer des ersten Spiegels als entscheidender Komponente bei optischen Diagnostiken an ITER
- Entwicklung eines Prototyp-Spektrometers zur Aufnahme und spektralen Analyse der CXRS Strahlung

Unterthema a):

Entwicklung von Prototypen für kritische mechanische Komponenten

1. Aufgabenstellung

Bei diesem Teil des Forschungsvorhabens wurde das Ziel verfolgt, unter intensiver Einbeziehung der Industrie kritische Prototyp-Komponenten für die ITER CXRS Diagnostik zu entwickeln, zu bauen und zu testen, einschließlich des Aufbaus von Mess- und Prüfeinrichtungen, um mit dem so gewonnenen spezifischen Know-How die Voraussetzungen für eine Übernahme entsprechender Aufträge seitens Fusion for Energy (F4E) zu schaffen, und somit zu einer zügigen und erfolgreichen Fertigstellung des ITER-Projektes beizutragen. Da die technischen Randbedingungen im Zuge der ITER-Entwicklung sich parallel zur Durchführung dieses Forschungsvorhabens weiter entwickelten, wurde eine parallele und iterative Bearbeitungsweise gewählt, bei der gezielt an einigen als besonders kritisch bekannten Fragestellungen gearbeitet wurde, und bei denen Lösungsvorschläge erarbeitet wurden, die sich flexibel an die konkreten technischen Anforderungen an ITER anpassen lassen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zum Zeitpunkt der Antragsstellung für dieses Vorhaben gab es Ergebnisse erster Vor-Studien, bei denen physikalische Fragen sowie Projektplanung zur Entwicklung der CXRS-Diagnostik im Rahmen eines EFDA tasks in Kollaboration mit Arbeitsgruppen bei den Partnern FOM/ITER-NL (Niederlande), UKAEA (UK) und HAS (Ungarn) durchgeführt worden waren. Ferner lagen die Ergebnisse des Vorgängerantrags 03FUS0001 vor. Auf Basis dieser genannten Vorarbeiten war letztlich der Finanzierungsantrag 03FUS0007 inhaltlich ausgerichtet worden, der auf eine Weiterführung, Ausweitung und Vertiefung der Entwicklungsarbeiten zu ITER CXRS abzielte, um so die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Bau des ITER CXRS Gesamtsystems zu schaffen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Während dieses Projekts wurden innerhalb des FZJ Projektteams die jeweils dringendsten und kritischsten technisch-physikalischen Fragestellungen für die Entwicklung des ITER CXRS Gesamtsystems identifiziert und laufend aktualisiert, mit dem Partnern im Konsortium sowie nach Möglichkeit mit dem ITER Team (Cadarache) inhaltlich abgestimmt und in konkrete Forschungsaufgaben umgesetzt, die letztlich als Basis für die zahlreichen vergebenen F&E-Aufträge an Industriefirmen sowie als Richtschnur für die eigenen F&E-Arbeiten innerhalb des Jülicher Projektteams dienten. Für die konkrete Vergabe von F&E-Aufträgen an Industriefirmen wurden die spezifischen Kompetenzen der Firmen abgefragt und Arbeitspakete gemäß Fördermittelantrag beauftragt. Die Ergebnisse der Projektarbeiten wurden in zahlreichen Meetings innerhalb des Jülicher Projektteams, des Konsortiums sowie mit den beteiligten Firmen detailliert besprochen und schließlich in Berichten, Vorträgen und Veröffentlichungen dargestellt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die verwundbarste Komponente jeder optischen Diagnostik an ITER ist der erste Spiegel, welcher der Strahlung sowie einem Teilchenfluss vom Plasma her ausgesetzt ist, was je nach Bedingungen zu Beschichtung, Abtragung (Zerstäubung) oder Versprödung der Spiegeloberfläche führt. In einem Port Plug, in welchem an ITER die CXRS Diagnostik-Komponenten eingebaut werden müssen, muss insgesamt ein Spiegel-Labyrinth eingesetzt werden, um die ionisierende Strahlung (insbesondere Neutronen) nach außen hin abzuschirmen. Unter typischen ITER-Bedingungen wird für den ersten Spiegel der CXRS-Diagnostik eine signifikante Schädigung innerhalb relativ kurzer Einsatzzeiten erwartet. Zum Schutz des Spiegels, bzw. der Verlängerung seiner Einsatzdauer bzw. der Erleichterung eines Spiegelaustausches, wurde zum Zeitpunkt der Antragsstellung die Notwendigkeit

gesehen, den Spiegel während Messpausen durch eine Verschlussklappe zu schützen ("shutter"), einen regelmäßigen Austausch des ersten Spiegels mittels eines zurückziehbaren Rohrs zu ermöglichen ("retractable tube"), alle Spiegel justierbar sowie heizbar und kühlbar zu montieren ("mirror mounts"), sowie einen mechanischen Rahmen für den Einbau aller Komponenten einschließlich Abschirmelementen bereitzustellen ("shielding cassette"). Erste Grobentwürfe für all diese Komponenten wurden in Jülich bereits seit 2006 entwickelt und untersucht. Als Basis dienten technische Spezifikationen und Rahmenbedingungen, die sich aus der ITER Dokumentation ergeben, welche unter www.iter.org/idm (passwortgeschützt) zugänglich ist.

Der wissenschaftliche Stand zur ITER CXRS Diagnostikentwicklung zum Zeitpunkt der Antragstellung ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dargestellt^{1,2,3}.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie bereits dargestellt, wird das ITER CXRS Projekt im Rahmen eines Konsortiums mit folgenden Partnern bearbeitet (Stand Anfang 2015):

FZJ (Konsortialführer)
KIT (Karlsruhe)
BME, Budapest (Ungarn)
FOM-DIFFER, Eindhoven (NL)
TU Eindhoven (NL)
CCFE, Culham (UK)

Third parties: Wigner RCP (Ungarn), CIEMAT (Spanien), Firma Optimal Optik (Ungarn)

Während der Bearbeitungszeit dieses Forschungsvorhabens gab es zahlreiche Kontakte und Treffen mit folgenden Organisationen:

ITER Organisation (IO), Cadarache
Fusion for Energy (F4E), Barcelona (europäische Organisation zum Aufbau von ITER)

Die intensiven Kontakte mit den Auftragnehmern (Firmen) wurden bereits oben erwähnt.

1 M. v. Hellermann et al., Physica Scripta. **T120** (2005) 19–29

2 R. Jaspers et al., Rev. Sci. Instrum. **79** (2008) 10F526

3 O. Marchuk et al., Rev. Sci. Instrum. **79** (2008) 10F532

II. Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Shielding Cassette

Der Port Plug für die CXRS Diagnostik besteht aus der Main Shell, der Shielding Cassette, dem Spiegelsystem und dem Retractable Tube. Weiterführende Informationen sind den nachfolgenden Publikationen zu entnehmen^{4,5,6}. Die Shielding Cassette dient dabei als Tragestruktur bzw. als Gehäuse für das Spiegelsystem der CXRS Diagnostik. In einer mit der Industrie durchgeführten Studie wurden verschiedene Varianten der Shielding Cassette für den oberen ITER Port Plug Nr.3 hinsichtlich der Fertigungsmöglichkeiten betrachtet.

Die Shielding Cassette ist ein Bestandteil der nuklearen Abschirmung. Sie muss sicherstellen, dass die äußeren Komponenten des Fusionsreaktors nur einer minimalen nuklearen Strahlung ausgesetzt werden. Aus diesem Grund muss die Shielding Cassette eine maximale mittlere Materialdichte aufweisen. Dieses hat zur Folge, dass alle Hohlräume und Spalten, die sich bei der Fertigung ergeben, mit Kühlwasser oder mit dem Grundmaterial der Cassette aufgefüllt werden. Im Idealfall soll nur der optische Pfad offen sein.

Die Abmessungen (ca. 5m x 0.8m x 0.8m) und die Funktion als Abschirmung des Fusionsreaktors ITER stellen besondere Anforderungen an das Design der Shielding Cassette. Die Hauptaufgaben, die innerhalb des Umfangs dieser Studie berücksichtigt wurden, sind:

- Vereinbarkeit von Design und zur Verfügung stehenden Bearbeitungs- und Fügetechniken
- Kompatibilität von Materialien an die besonderen Anforderungen für die Fusionstechnik (Strahlungswiderstand, magnetische Eigenschaften, Vakuumkompatibilität etc.)
- Übereinstimmung des Designs mit den Qualitätsstandards der nuklearen Sicherheitstechnik
- Strahlungsinduzierte Wärmebelastung
- Induzierte Spannungen durch transiente Magnetfelder

Als Designgrundlage wurde das 700-MW Szenario von ITER gewählt, da hierbei die größten thermischen Betriebslasten auftreten. Die thermischen Belastungen aus diesem Betriebsmodus wurden als Ausgangsdaten für alle CXRS Komponenten übernommen.

Das Grundmaterial der Shielding Cassette ist 316 L (N) -IG2 1. Dieses Material wird auch für den Vakuumbehälter verwendet. Der Kobalt- und Niob-Gehalt sollte so niedrig wie möglich sein und weniger als 0,05 Gew% bzw. <0,01 Gew% betragen. Unter Berücksichtigung der Anforderung an die Wiederverschweißbarkeit bestrahlten Materials sollte der Gehalt an Bor bis 10 wppm begrenzt sein. Die Begrenzung von Stickstoff und Kohlenstoff (0,080 Gew% und 0,030 Gew%) begünstigt die Elektronenstrahlschweißung von dicken Platten.

Die drei in dieser Studie betrachteten Varianten unterscheiden sich durch die Verbindungsart der einzelnen Teile und die sich hieraus ergebenden unterschiedlichen Fertigungsverfahren.

4 Yu. Krasikov et al., *Development of design options for the port plug components of the ITER core CXRS diagnostic*, Fusion Engineering and Design **86** (2011) p. 2055-59

5 O. Neubauer and S. Sadakov, *Design concepts for the ITER CXRS Port Plug*, Jahrestagung Kerntechnik, Dresden 2009

6 S. Sadakov, W. Biel, M. von Hellermann, Yu. Krasikov, O. Neubauer, A. Panin, *Selected Design Solutions for the Integration of the CXRS Diagnostic into ITER Upper Port Plug No. 3*, Fusion Science and Technology **56** 134 (2009)

Designvorschläge für die Shielding Cassette

Variante 1: Sandwichbauweise

Die Shielding Cassette ist in Längsrichtung in eine obere und eine untere Hälfte geteilt. Die beiden Hälften werden anschließend verschraubt. Dieses Prinzip wird in Abb. A1 verdeutlicht.

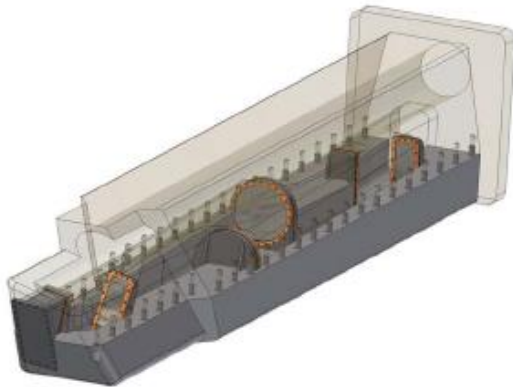


Abb. A1: Shielding Cassette in Sandwichbauweise

Vorteile:

- Wenige Schweißnähte mit geringer Eindringtiefe

Nachteile:

- Schwierige und nur mit großen Abweichungen mögliche Herstellung der Kühlleitungen durch Tieflochbohren (5 m Länge)
- Begrenzte Zugänge zu den inneren Öffnungen durch Fräsmaschinen
- Die geforderten optischen Toleranzen des Spiegelsystems sind nicht erreichbar.

Variante 2: Blöcke mit Deckplatten

Die Shielding Cassette besteht aus mehreren Blöcken mit Deckplatten. Diese Teile werden anschließend mit dem Hauptblock verschweißt, siehe Abb. A2.

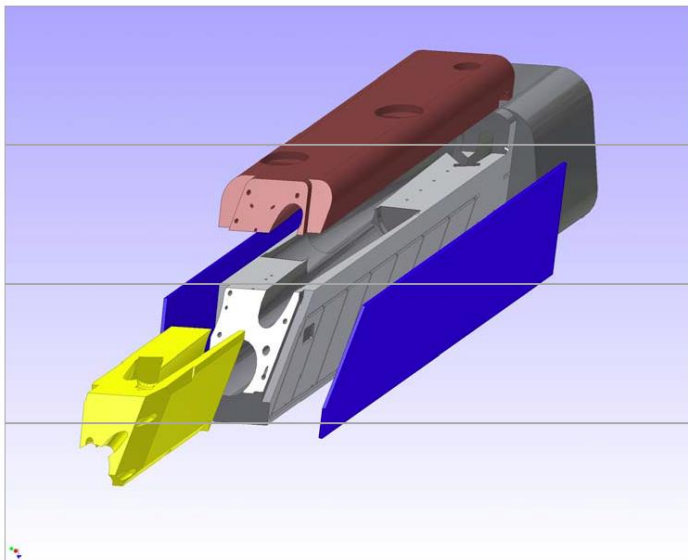


Abb. A2: Shielding Cassette als Block mit Deckplatten

Vorteile:

- Guter Zugang für die Bearbeitung der Kühlkanäle

Nachteile:

- Begrenzter Zugang zur Bearbeitung des optischen Kanals für das Spiegelsystem
- große Schweißnahttiefe für die einzelnen Blöcke erforderlich (ca. 100 mm Tiefe) sowie geringere Schweißnahttiefe für die Abdichtung der Kühlleitungen durch die Deckplatten
- Umfangreiche Qualitätskontrolle für die Schweißverbindungen notwendig

Variante 3: Aufbau aus einzelnen Segmenten

Die Shielding Cassette ist der Länge nach in einzelne Blöcke unterteilt. Die Länge der Blöcke beträgt ca. 1m. Diese Blöcke werden dann mittels einer Elektronenstrahlschweißung verbunden.

Vorteile:

- Verbesserter Zugang für die Bearbeitung von Kühlbohrungen und optischem Kanal
- Kleinere Größe der zu beschaffenden Rohstoffblöcke

Nachteile:

- Große Tiefe der Schweißnaht notwendig (ca. 100 mm Tiefe)
- Umfangreiche Qualitätskontrolle der Schweißverbindungen

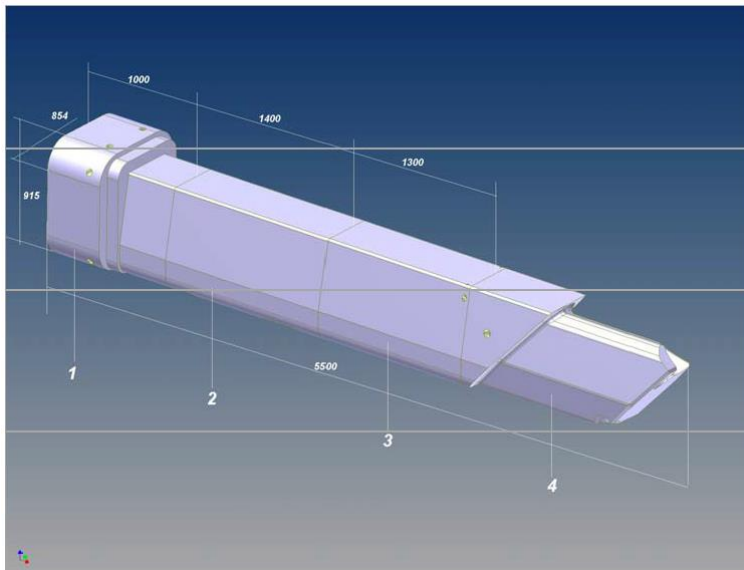


Abb. A3: Aufbau der Shielding Cassette aus einzelnen Blöcken

Für die weitere Entwicklung der Konstruktion wurde der Aufbau der Shielding Cassette aus einzelnen Segmenten als Referenzdesign ausgewählt (s. Abb. A3). Diese Option bietet die höchste Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitung der inneren Geometrie des optischen Kanals und der Kühlkanäle. Durch den segmentierten Aufbau der Cassette vereinfacht sich die Herstellung der einzelnen Kühlkanäle, wodurch das für die Abschirmung notwendige Verhältnis von Stahl zu Wasser genauer einzuhalten ist. Durch die in den einzelnen Segmenten vorhandenen Kühlkanäle gestaltet sich die Schweißung allerdings aufwändiger. Anhand von Probeschweißungen sollte die Machbarkeit dieses Verfahrens nachgewiesen werden.

Dieser Aufbau reduziert auch die Dimension der Rohmaterialblöcke auf leichter überschaubare Größen. Daher wird eine signifikante positive Wirkung auf die Preise der Materialbeschaffung erwartet.

Das jetzige Referenzdesign besteht aus 5 Segmenten mit jeweils eigenem Kühlkreislauf. Durch diese Unterteilung ist es möglich, den Wasserkreislauf genau auf die jeweiligen Temperatur- und Strahlungsverhältnisse abzustimmen.

Die Berechnungen, die zusammen mit einem Industriepartner durchgeführt wurden, zeigten Bereiche auf, in denen die Fließgeschwindigkeit des Kühlmittels zu stark absank, wodurch es zu einer zu starken Erhitzung dieser Bereiche kam. Daraufhin wurden Möglichkeiten erörtert, wie sich durch eine veränderte Zusammenschaltung der Kühlleitungen dieses Problem lösen lässt. Eine Vergrößerung der Radien in der Außenkontur führte zu einer Verbesserung der Wärmeabfuhr.

Aufgrund dieser Veränderungen war eine erneute Berechnung der sich im Betrieb einstellenden Wärmeverteilung in den beiden ersten Segmenten der Shielding Cassette notwendig. Die Ergebnisse der Berechnungen für das erste Segment sind in Abb. A4 dargestellt und wurden bei der Konstruktion der Cassette berücksichtigt.

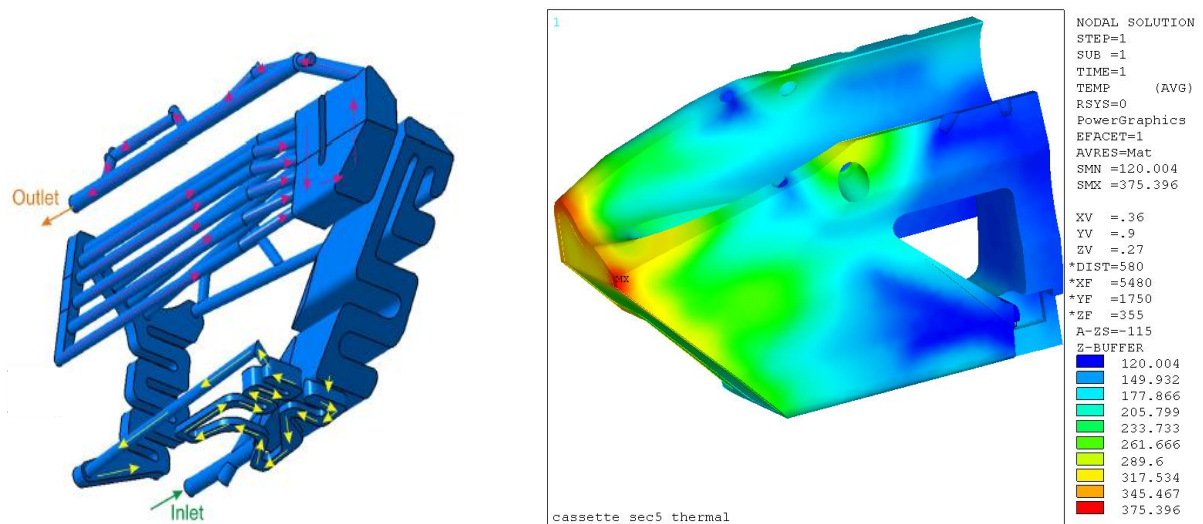


Abb. A4: Anordnung der Kühlkanäle und die sich einstellende Wärmeverteilung im ersten Segment der neuen Shielding Cassette.

Fertigungstechnologie

Es ist vorgesehen, dass die einzelnen Blöcke (s. Abb. A5) komplett vorgefertigt werden. Jeder Block soll mit einem Übermaß vorbearbeitet werden, um Verformungen auszugleichen, die durch die folgenden Schweißschritte entstehen.

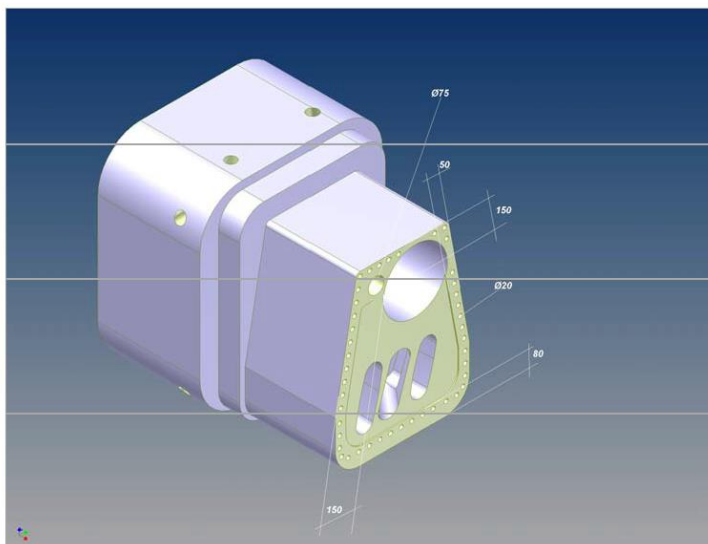


Abb. A5: Vorgefertigter Block der Shielding Cassette

Die Bearbeitung kann auf Standard-Portalfräsmaschinen durchgeführt werden. Gewicht und Länge der Shielding Cassette liegen im Bereich von größeren Fräsmaschinen, die auch zur Bearbeitung von Schiffsmotoren und Kraftwerksturbinen eingesetzt werden. Zum Fräsen der komplizierteren optischen Kanäle sind 5-Achs-Fräsmaschinen erforderlich.

Bei diesem Aufbau der Shielding Cassette ergibt sich die Notwendigkeit einer sicheren Verschweißung des Werkstoffes 1.4429 ESU, der in seiner Spezifikation nahe an den Werten des 316 L IG2 liegt, mit Wanddicken von mindestens 100 mm bei hoher Schweißnahtqualität.

Aus Gründen der geringen Wärmeeinbringung und des geringen Verzuges wurde zur Verbindung der einzelnen Blöcke das Elektronenstrahlschweißverfahren ausgewählt. Weil für den hier zum Einsatz kommenden stickstofflegierten Grundwerkstoff bisher nur Einschweißstiefen von ca. 50 mm als Stand der Technik angesehen werden, wurden Schweißversuche mit Wanddicken > 100 mm durchgeführt.

Zudem sollte nachgewiesen werden, dass bei Elektronenstrahlschweißnähten an diesem Werkstoff in der „ITER-Version“ die nach dem Stand der Technik üblichen mechanisch-technologischen Werte erzielt werden können.

Ein wesentlicher Punkt für die Qualifikation des Schweißverfahrens bestand in der Untersuchung, dass beim Fügen der großen Blöcke die vorher eingebrachten Kühlleitungen nicht aufgrund von Schweißverzügen beschädigt werden, und dass somit die Dichtheit der Gesamtkomponente sowohl nach innen wie nach außen gewährleistet werden kann. Dies ist wichtig, weil es fertigungstechnisch erheblich einfacher ist, die Kühlleitungen bereits vor dem Schweißen, d.h. in den jeweiligen einzelnen Blöcken, einzubauen.

Dieser Nachweis konnte geführt werden. Die entsprechende Schliffuntersuchung aus diesem Bereich zeigt keinerlei relevante Unregelmäßigkeiten oder fügetechnische Fehler (s. Abb. A6), die nach DIN EN 13919-1 Level B unzulässig wären.

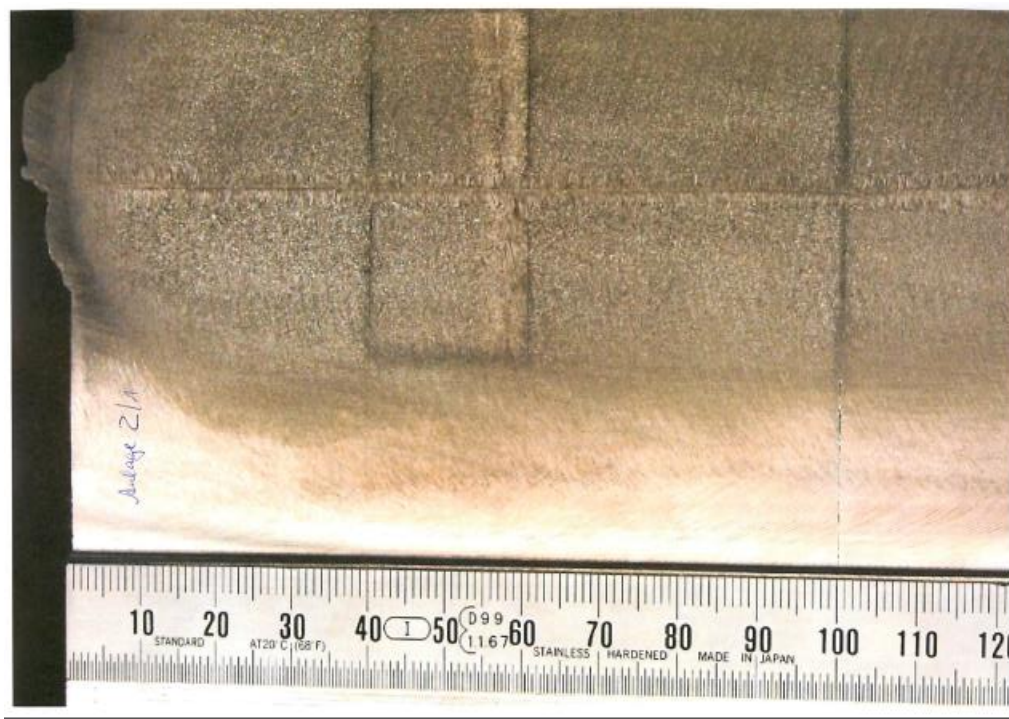


Abb. A6: Schliffbild der Überschweißung eines Kühlkanals

Im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen wurde der Nachweis erbracht, dass der Werkstoff 1.4429 ESU bei Einschweißstiefen bis mindestens 120 mm unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen (z.B. Stromstärke) reproduzierbar beherrscht werden kann. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass der Grundwerkstoff im Stickstoffgehalt eingeschränkt wird.

Die magnetische Permeabilität wurde am unbeeinflussten Grundwerkstoff sowie in mehrfach

überschweißten Bereichen gemessen. Dabei zeigten sich nur äußerst geringe Veränderungen von 1,002 auf überwiegend 1,003 bis max. 1,004.

Im Hinblick auf die Prüfungen ist noch dahingehend Vorarbeit zu leisten, dass Probekörper herzustellen und eine Prüfanweisung anzufertigen sind, die eine reproduzierbare Ultraschallprüfung der Schweißnähte unter Originalbedingungen, d.h. an sehr großvolumigen Teilen, bis zu Wanddicken von ca. 120 mm zulassen. Röntgenprüfungen, auch mit Isotopen, lassen sich hier nicht sinnvoll einsetzen.

Retractable Tube Design

Der erste Spiegel (M1) ist der wichtigste Spiegel der CXRS-Diagnostik. Dieser ist in direkter Sichtlinie zum Plasma angeordnet und somit einer großen Neutronen- und Wärmestrahlung ausgesetzt. Bedingt durch diese Position können sich auf dem ersten Spiegel Kohlenstoff und Beryllium ablagern, hierdurch verringert sich sehr schnell die Reflektivität des Spiegels. Die Lebensdauer des ersten Spiegels bestimmt die Einsatzdauer der CXRS-Diagnostik. Um einen häufigeren Austausch des ersten Spiegels zu ermöglichen, ohne jedesmal den gesamten Port Plug ausbauen zu müssen, wurde zu Projektbeginn die Option eines „Retractable Tubes“ auf ihre Eignung für ITER CXRS hin untersucht. Nach diesem Konzept ist an der Spitze des Retractable Tubes der erste Spiegel befestigt. Das Retractable Tube (s. Abb. A7) ermöglicht dann einen einfachen und auch häufigeren Austausch des ersten Spiegels (M1). Weitere Informationen zu den einzelnen Optionen sind in einer Publikation zu finden⁷.

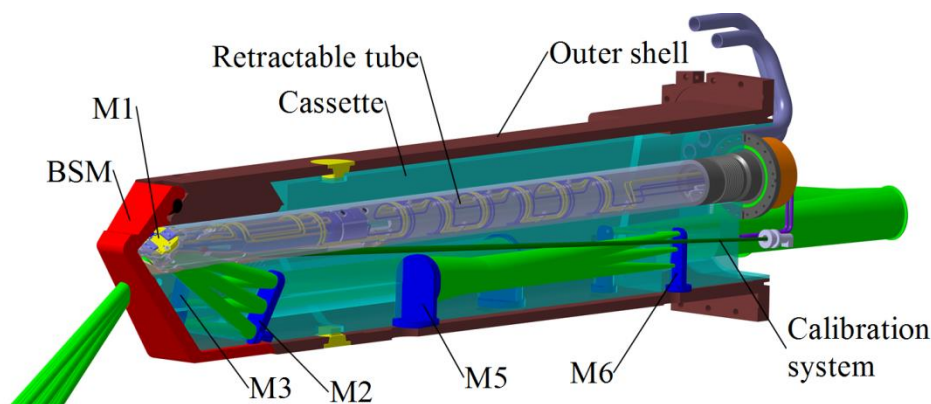


Abb. A7: Port Plug mit der Option „Retractable Tube“

Steht M1 während einer gesamten Plasmaphase in direkter Sichtlinie zum Plasma, so wird auf Basis vorliegender Berechnungen zurzeit davon ausgegangen, dass seine Lebensdauer nur etwa 4 – 12 Monate betragen könnte. Dieses hätte zur Folge, dass der Spiegel M1 bis zu 60-mal ersetzt werden müsste. Vorgesehen ist ein möglicher Wechsel jedoch höchstens etwa viermal während der gesamten Betriebszeit von ITER.

Um die Anzahl der Wartungsintervalle zu verringern, wurden drei verschiedene Optionen des Retractable Tubes betrachtet. Die erste und zweite Option ist ein Retractable Tube mit zwei bzw. drei Ersatzspiegeln, dieses würde die Anzahl der Wechsel des Tubes um den Faktor zwei bis drei verringern. Ein weiterer Weg, um die Lebensdauer des ersten Spiegels zu erhöhen, ist der Einsatz eines Shutters vor dem ersten Spiegel. Arbeitet der Shutter im gleichen Arbeitszyklus wie der Diagnostic Neutral Beam (DNB), so ließe sich die Abscheidungsrate auf dem Spiegel um den Faktor 7 reduzieren. Beide beschriebenen Optionen können jedoch nicht komplett den regelmäßigen Austausch des Retractable Tubes und damit auch des ersten Spiegels vermeiden.

⁷ T. Baross et al., *Retractable tube design issues in ITER CXRS UPP #3*, Fusion Engineering and Design **88** (2013) 1352-1356

Option: Ersatzspiegel in einem Karussell

Bei dieser Option befindet sich auf dem Retractable Tube ein Karussell mit Ersatzspiegeln (s. Abb. A8). Durch die Rotation des Karussells wird ein unbrauchbar gewordener Spiegel durch einen neuen Spiegel ersetzt.

Der Nachteil dieser Option liegt in dem aufwendigen und vakuumtauglichen Drehmechanismus des Karussells. Besondere Probleme bereitet hierbei die metallische Reibung im Vakuum. Es ist sicher zu stellen, dass kein Stick-Slip-Effekt auftritt. Aufgrund der geforderten hohen Qualität des Vakuums an ITER ist auch der Einsatz von Schmiermitteln nicht möglich.

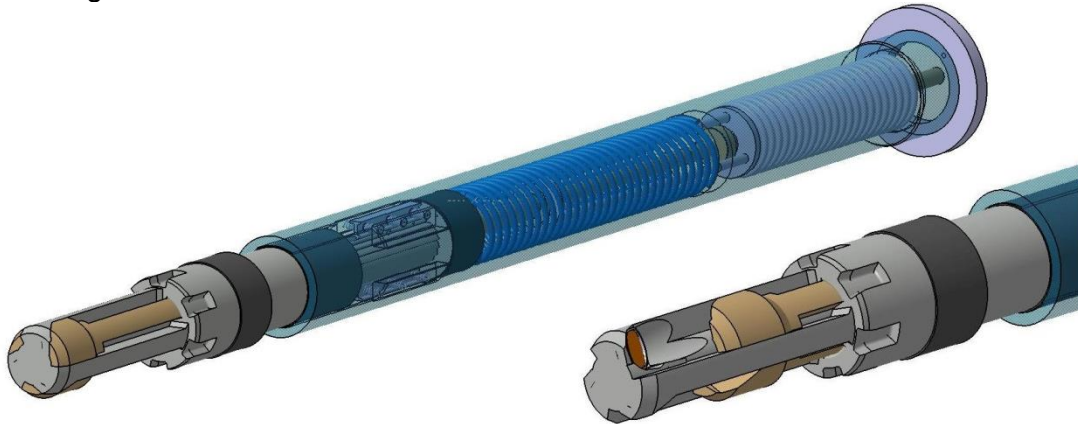


Abb. A8: Ersatzspiegel in einem Karussell

In dieser Option ist ein Shutter vorgesehen, der den Strahlengang während der Hochphase des Plasmabetriebs öffnet. Spiralförmig angeordnete Kühlleitungen (blaue Farbe in Abb. A8) für den Spiegel und Shutter ermöglichen die Drehung des Karussells mit drei Spiegeln und ermöglichen eine kombinierte Dreh- und axiale Bewegung des Verschlusses.

Option: Zwei Spiegel auf zwei Haltern

Dieses Modell wurde entwickelt, um die Anzahl der Gleitflächen und damit auch die Komplexität der Vorrichtung zum Wechseln der Spiegel zu verringern. Diese hat allerdings zur Folge, dass auch die Anzahl der Reservespiegel kleiner wird. Diese Option besitzt ebenfalls einen Shutter, um den Strahlengang vom Plasma zum Spiegel zu unterbrechen.

Bei dieser Option sind ein Spiegel und der Shutter in Längsrichtung verschiebbar angeordnet. Diese beiden Teile werden auf Rollen gelagert (s. Abb. A9). Wird der untere Arm (blau) mit Spiegel nach vorne bewegt, so klappt der andere Arm nach oben und gibt den Platz für den Reservespiegel frei. Der Shutter führt in diesem Fall eine Längsbewegung aus. Alle Bewegungen werden durch ein Gestänge realisiert, die notwendigen Aktuatoren sind außerhalb des Vakuums angeordnet. Konstruktionsbedingt sind bei diesem Shutter nur langsame bzw. seltene Bewegungen zum Öffnen und Schließen möglich.

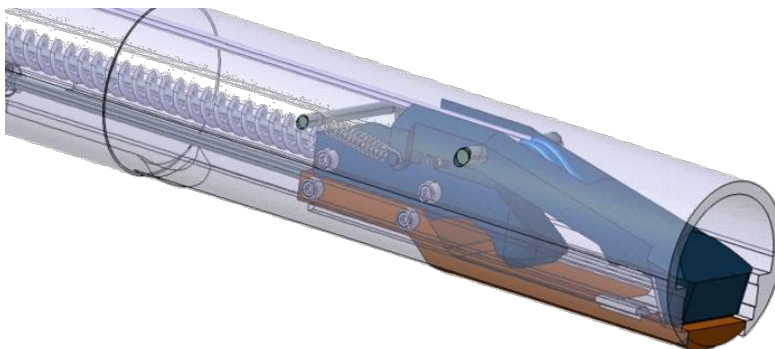


Abb. A9: Zwei Spiegel auf zwei separaten Haltern

Die beiden Konzepte mit Ersatzspiegeln wurden in der internen Bewertung als zu kompliziert eingestuft und sie ermöglichten auch keine deutliche Verringerung der zeitlichen Abstände zwischen den erforderlichen Wartungsintervallen. Aus diesem Grund wurden diese beiden Konzepte nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde ein weiteres Konzept als aussichtsreichste Option entwickelt, bestehend aus einem einzelnen Spiegel und einem Shutter mit kurzen Öffnungszeiten, welches im Folgenden dargestellt ist.

Option: Einzelspiegel und schneller Shutter

Auch bei dieser Option ist der erste Spiegel am Kopfteil des Retractable Tubes befestigt (s. Abb. A10). Diese Option bietet eine Reihe von Vorteilen im Hinblick auf thermische Expansion und im Vergleich zu den vorher diskutierten Lösungsansätzen:

- Abhängig von der Effektivität des Shutters lässt sich die Anzahl der Wartungsintervalle deutlich reduzieren.
- Um den Längenausgleich bei thermischer Expansion zu gewährleisten, werden metallische Bälge eingesetzt. Hierdurch wird eine metallische Reibung im Vakuum vermieden und die Lebensdauer verlängert.
- Metallische Bälge besitzen nur einen kurzen Federweg, somit müssen die Kühlleitungen keine veränderlichen Spalten überbrücken.
- Der Durchmesser des Retractable Tubes kann geringer gewählt werden als bei den früheren Optionen, somit ist die Integration in den Port Plug einfacher.
- Die größere Wandstärke ermöglicht ein leichteres Einbringen der Kühlkanäle.

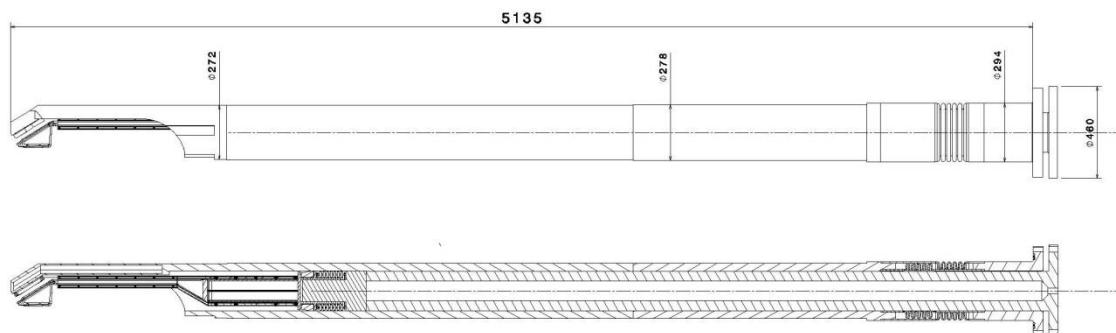


Abb. A10: Abmessungen Referenz Design

Temperaturverteilung im Retractable Tube

Die nachfolgende Abb. A11 zeigt die Temperaturverteilung im Retractable Tube für das 700 MW Szenario. Es ist zu erkennen, dass sich im Tube eine Temperatur von ca. 150°C einstellen wird. Der Spiegel und der Halter wurden in diesem Fall gesondert berechnet.

Einfluss der EM-Lasten auf das Retractable Tube

Das geschätzte Drehmoment, hervorgerufen durch die EM-Effekte, beträgt an der Spitze des Tubes ca. 3500 Nm. Dies gilt für eine Feldänderungsrate von 50T / s für einen ersten Spiegel aus Molybdän [150 * 110 * 20 mm] und einen Spiegelhalter aus Edelstahl [550 * 200 * 45 mm]. Der genaue Berechnungsverlauf ist in den aufgeführten Veröffentlichungen zu finden^{8,9,10}.

In Abb. A12 ist zu erkennen, dass sich die max. Verformung durch EM-Lasten und Temperaturlasten an der Spitze des Tubes einstellt. Für die gegebenen Randbedingungen zeigt die

8 A. Panin et al., *Electromagnetic modeling and subsequent structural analysis for ITER core CXRS upper port plug diagnostic structure*, Fusion Engineering and Design **86** (2011), 2016 – 2020

9 A. Belov et al., *Electromagnetic transient simulation using a shell approach for ITER CXRS upper port plug due to plasma vertical displacement events*, Fusion Engineering and Design **86** (2011), 1920 - 1923

10 A. Nemov et al., *Detailed structural analyses for ITER core CXRS port plug components based on 3d electromagnetic transient simulation*, 26th Symposium on Fusion Technology, Porto, Portugal Sep. 27-Oct.1, 2010

Simulation eine akzeptable Temperaturverteilung ohne starke Temperaturgradienten.

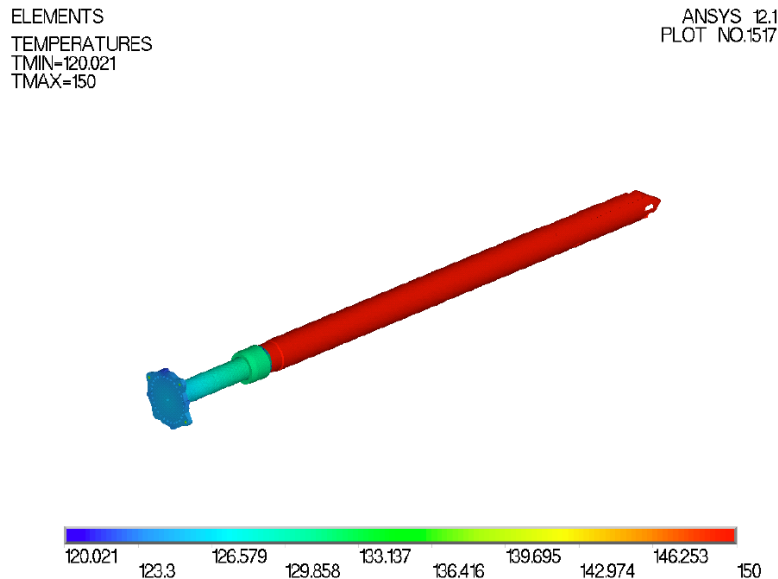


Abb. A11: Temperaturverteilung im Retractable Tube ($^{\circ}\text{C}$).

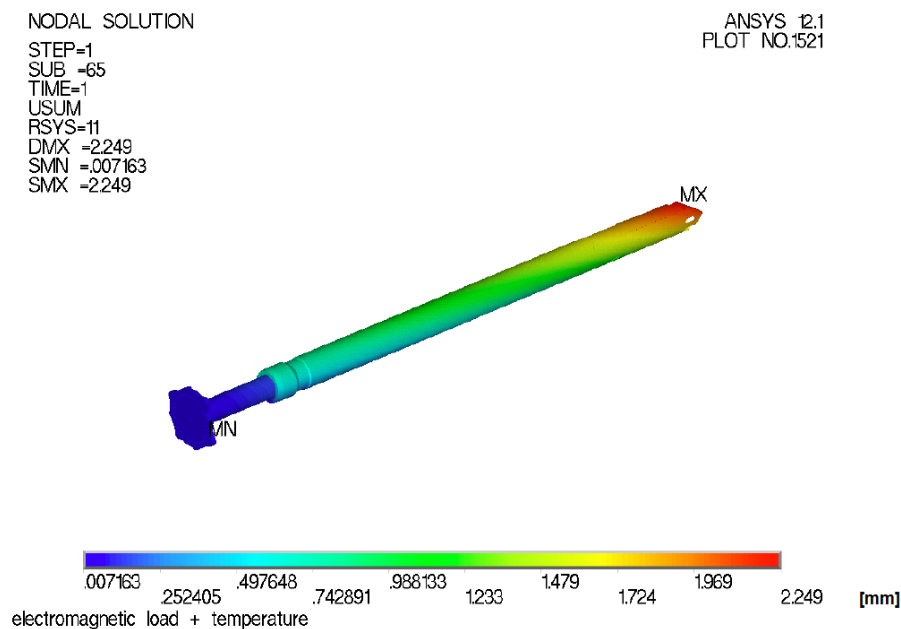


Abb. A12: Gesamtverformung des Tubes unter EM-Lasten und Temperatureinfluss (mm)

Shutter und Aktuator

Die Aufgabe des Shutters ist der Schutz des Spiegels M1. Werden keine Messungen durchgeführt, verschließt der Shutter die Blende und unterbricht so den Fluss an Teilchen aus dem Plasma auf den ersten Spiegel. Dieser Schutz ist notwendig, um die geforderte Lebensdauer des Spiegels und damit des Gesamtsystems zu erreichen.¹¹

Für die Realisierung des schnellen Shutters wurde ein Konzept mit zwei symmetrischen Armen und einem reibungsfrei arbeitenden Antrieb ausgewählt. Die Symmetrie der Arme ist

¹¹ Panin, A. et al., *Dynamic performance of frictionless fast shutters for ITER: numerical and analytical sensitivity study for the development of a test program*, Fusion engineering and Design 2015 (in press)

wichtig, da hierbei keine Biegemomente auf den Antrieb aufgebracht werden. Der reibungsfreie Antrieb soll verhindern, daß im Vakuum auftretende Stick-Slip-Effekte die Bewegung des Antriebskolbens beeinträchtigen.

Der Shutter ist als Rohrkonstruktion ausgeführt. Die Rohre dienen hierbei gleichzeitig als Kühlleitungen. Die beiden flexiblen Arme des Shutter tragen am Ende die Shutter Blades, durch welche die Blende verschlossen wird. Angetrieben wird der Shutter durch einen pneumatischen Aktuator. Durch eine axiale Bewegung des Kolbens von 2 mm werden die beiden Arme um jeweils 32 mm nach außen gebogen und ermöglichen dadurch die Messung. Beide Arme bilden zusammen einen Kühlkreislauf. Die Shutter Blades sind so ausgelegt, daß sie großen Wärmelasten widerstehen können. Die Oberfläche trägt eine spezielle Beschichtung (keramischer Diffusor), um eine Kalibrierung des optischen Systems zu ermöglichen. Die nachfolgende Abbildung A13 verdeutlicht den Aufbau des Shutters.

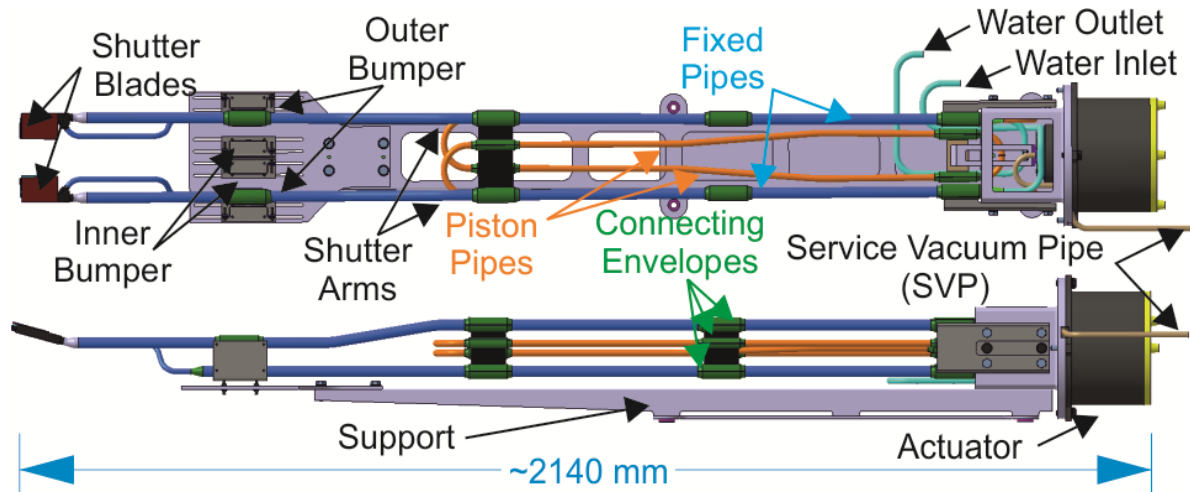


Abb. A13: Shutter auf Supportstruktur

Der Aktuator ist ein doppelwirkender, reibungsloser pneumatischer Antrieb. Der Aktuator besteht aus zwei durch Bälge getrennten separaten Kammern. Durch die Druckdifferenz zwischen den beiden Kammern wird der Kolben in die gewünschte Richtung bewegt. Der Balg der inneren Kammer ist mit dem Kolben verbunden, welcher durch die Federelemente (Disc Springs) wiederum mit dem Gehäuse verbunden ist (Abb. A14). Eine zweifache Balgeinheit bildet die Vakuumbarrriere zwischen der äußeren Kammer und dem Umgebungsvakuum.

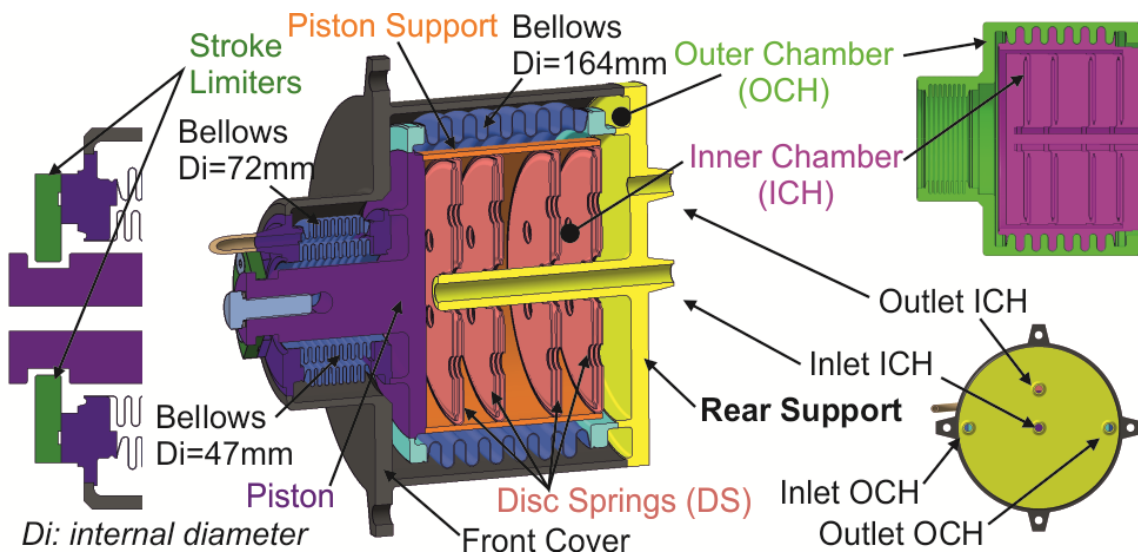


Abb. A14: Prinzipdarstellung des Aktuators

Abbildung A15 zeigt den in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen gefertigten Shutter.



Abb. A15: Prototyp des Shutters

Der Prototyp des Shutters sollte in einer Vakuumkammer getestet werden. Untersucht werden sollen hierbei die Funktionsfähigkeit, das Schwingungsverhalten im Vakuum und die Lebensdauer unter typischen Einsatzbedingungen.

Der Shutter wird auf einer hierfür entwickelten Tragwerkskonstruktion in der Vakuumkammer befestigt. Anschließend soll ein typischer Lastwechsel simuliert werden. In diesem Versuch sollen die Bewegungen der Shutterarme, das Einfallen in die Bumper, die Verformung der Bumper und die Schwingungen der Shutterarme im Vakuum gemessen werden.

Vorläufige Ergebnisse der Messung der ersten Eigenfrequenz

Für diese Messung werden zwei Lasermikrometer (KYENCE LK-G502) verwendet, die auf die Shutter Blades ausgerichtet sind, wie in Abb. A16 gezeigt.

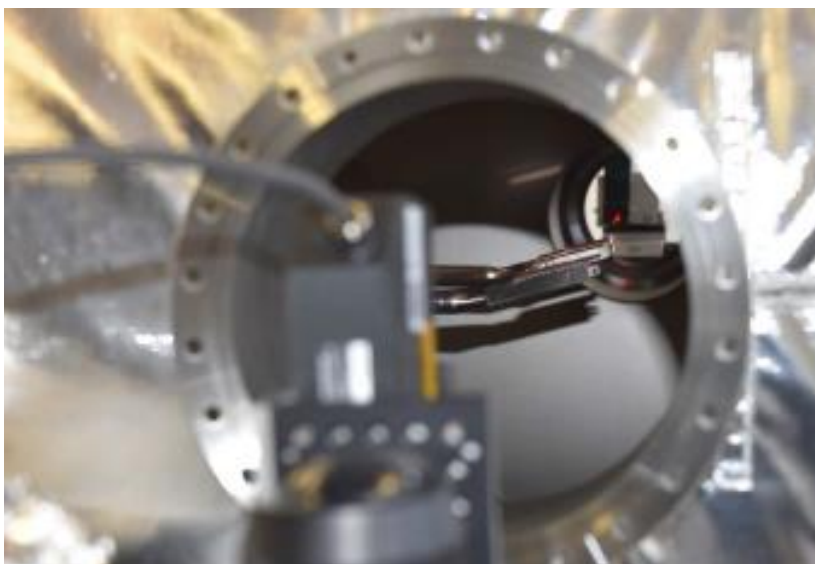


Abb. A16: Messaufbau mit zwei Sensoren

Durch einen kurzen Impuls werden die Arme zum Schwingen angeregt, bis aufgrund der Dämpfung des Materials die Schwingung abgeklungen ist. Über die Sensoren wird während

dieser Zeit die Verschiebung der Shutter Blades gemessen. Durch diese Messungen lassen sich die erste Eigenfrequenz (f_1) und der dimensionslose Dämpfungskoeffizient (γ) bestimmen. Die ermittelte erste Eigenfrequenz wird mit den Werten aus früheren numerischen Berechnungen verglichen. Der genauere Berechnungsverlauf ist in den nachfolgenden Publikationen zu finden^{12,13}.

Abbildung A17 zeigt die vom Sensor OUT2 erhalten Signale während der freien Schwingung der Shutterarme.

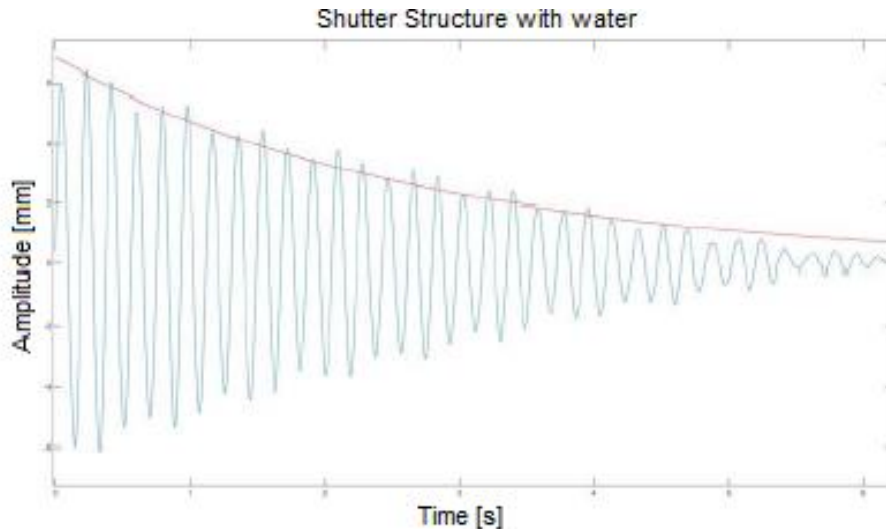


Abb. A17: Schwingungen der Shutterarme, Struktur mit Wasser gefüllt

Die rote Kurve verdeutlicht das Abklingen der Amplitude. In Abb. A18 ist die erste ungedämpfte Eigenfrequenz zu erkennen. Sie liegt bei $f_1 = 5,371$ Hz, der sich aus der FEM-Berechnung ergebende Wert liegt bei 5,34 Hz.

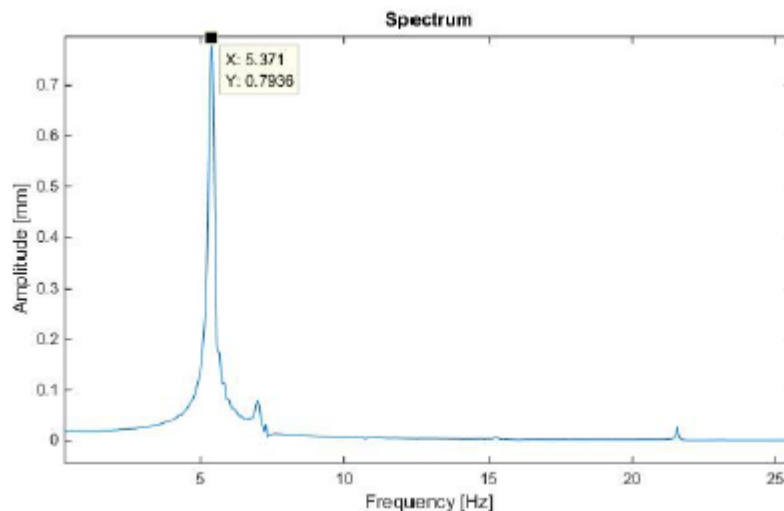


Abb. A18: Erste Eigenfrequenz des Shutter bei $f_1 = 5,371$ Hz

Diese Messungen wurden ebenfalls für den Shutter mit angebautem Aktuator durchgeführt (siehe Abb. A19), wobei eine erste ungedämpfte Eigenfrequenz von 7,08 Hz ermittelt wurde.

12 A. Panin et al., *STRUCTURAL ANALYSIS OF A PROTOTYPE FAST SHUTTER FOR ITER cCXRS DIAGNOSTIC*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE **40** (2012) 746 - 752

13 D. Castano Bardawil, *Fast shutter concepts for the modified ITER cCXRS upper port plug diagnostic system*, 27th Symposium on Fusion Technology, Liège, Belgium, Sep. 24-28, 2012

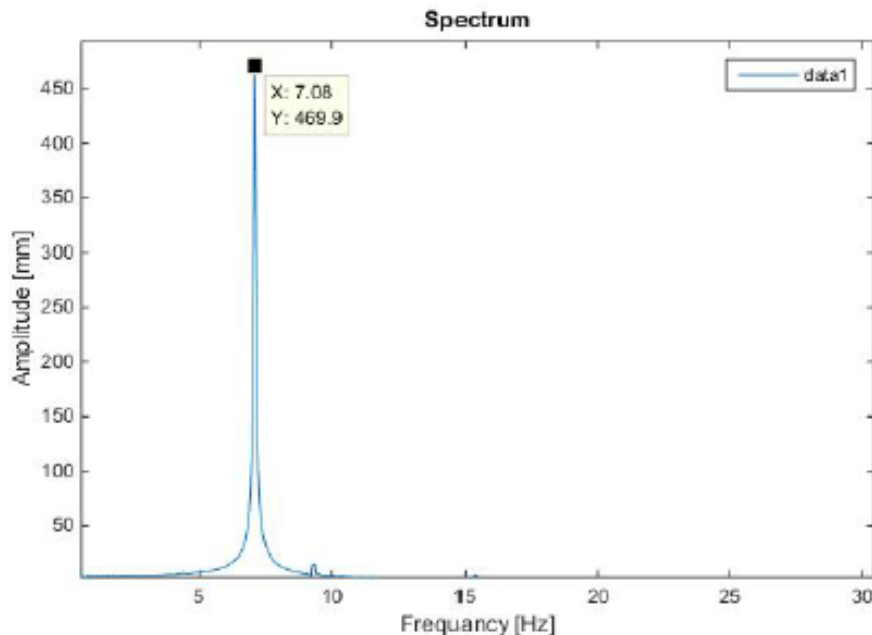


Abb. A19: Erste Eigenfrequenz des Shutter mit Aktuator bei $f_1 = 7,08$ Hz

Der sich aus der FEM-Berechnung ergebende Wert für die erste Eigenfrequenz liegt bei 6,78 Hz. Diese Abweichung ergibt sich aus der angenommenen Steifigkeit des Aktuators. Die Steifigkeit der Bälge kann fertigungsbedingt bis zu 20% variieren. Zusätzlich wurde die Steifigkeit der Tellerfedern gemessen, es ergab sich ein mittlerer Wert von 255 N/mm anstelle des berechneten von 184 N/mm. Unter Berücksichtigung dieser neuen Werte ergab sich in der numerischen Berechnung für die ungedämpfte Eigenfrequenz ein Wert von 6,95 Hz. Der berechnete Wert und der gemessene Wert liegen somit sehr dicht beieinander.

Prototyp des vereinfachten Shutters zur Untersuchung der Shutter-Dynamik

Hinsichtlich der geplanten experimentellen Untersuchung des mechanischen Verhaltens und zur Validierung der numerischen Berechnungsmodelle wurde parallel zu den Arbeiten am Fast Shutter ein vereinfachter Shutter (Simplified Shutter) entwickelt (vgl. Abb. A20).

Beide Shutter arbeiten nach dem gleichen Prinzip: Ein pneumatischer Aktuator leitet ein Biegemoment auf die einseitig festeingespannten Shutter-Arme ein und bewirkt so eine elastische Verformung der Arme senkrecht zur Wirkungsline des Aktuators. Am Ende der 2 m langen Arme befinden sich die Blades, welche durch die Armverformung zum Schutz des Ersten Spiegels vor die Öffnung im Port Plug bewegt werden und so den optischen Pfad zwischen dem Plasma und dem Ersten Spiegel versperren. Dieser Vorgang des Öffnens bzw. Schließens geschieht innerhalb von 0,7 s. Die freie Verformung der Arme wird nach wenigen Millimetern durch die Bumper abgefangen, die als Wegbegrenzer bzw. Stoßfänger dienen, und eine weitere Öffnungs- bzw. Schließbewegung der Arme verhindern. Während der freien Biegebewegung der Arme zwischen den inneren und den äußeren Bumpers kann das Shutter-System als statisch betrachtet werden. Sobald die Arme auf die Bumper stoßen, entsteht eine lokale Restriktion der freien Verformung und die verbleibende kinetische Energie der Arme führt zu einer Schwingbewegung der übrigen Armgeometrie in Form der 5. Eigenmode. Zusätzlich treten im Kontaktbereich der Bumper sog. Rebounds auf, d.h. die Arme prallen von den Bumpers zurück und oszillieren mit der 1. Eigenform, sodass eine Überlagerung der 1. und der 5. Eigenform erfolgt. Das mechanische Verhalten geht in diesem Fall von statisch in dynamisch über. Eine Voraussage dieses dynamischen Verhaltens ist sehr komplex und mit hohem numerischem Rechenaufwand verbunden.

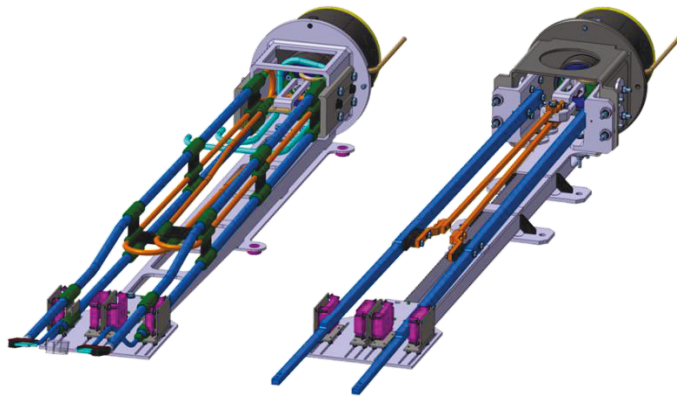


Abb. A20: Fast Shutter (links) und Simplified Shutter (rechts) mit pneumatischem Aktuator im hinteren, sowie Bumper System im vorderen Bereich

Die Hauptaufgabe bei der Entwicklung des Simplified Shutters war die Reduzierung der Komplexität unter Beibehaltung der mechanischen Eigenschaften wie der Massenverteilung und der Produktsteifigkeit sowie der Umsetzung der Parametrisierbarkeit. Aus diesem Grund wurde eine Massen-Steifigkeit-equivalente Geometrie abstrahiert und in ein einfaches Balkenmodell übertragen. Die Haupteigenschaft des Simplified Shutters ist die variable Geometrie, welche Änderungen im mechanischen (speziell dynamischen) Verhalten ermöglicht. Numerische Untersuchungen haben gezeigt, dass die mechanische Vorspannung, die Produktsteifigkeit und die relevanten Eigenfrequenzen in dem für die Testreihe relevanten Bereich variiert werden können (Abb. 20).

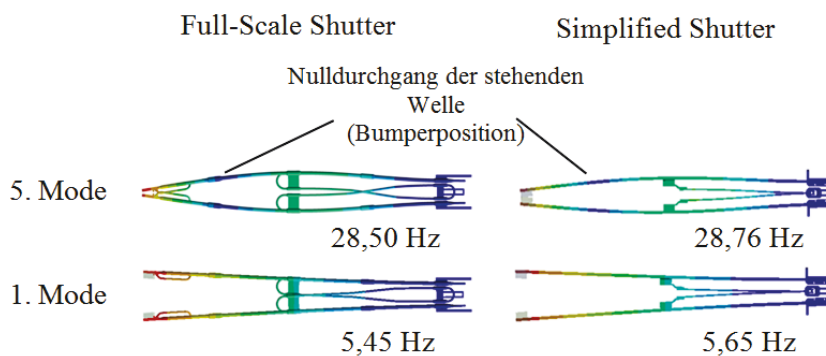


Abb. A21: Eigenfrequenzen und dazugehörige Eigenmoden des Full-Scale Shutters und des Simplified Shutters

Da keine thermischen Tests mit dem Simplified Shutter vorgenommen werden, wurde auf die Kühlmittelführung der Arme verzichtet. Das zur Auslegung verwendete mathematische Modell basiert auf der eindimensionalen Dichteverteilung des Full-Scale Shutters, wobei die Masse des Kühlmittels mitberücksichtigt wird. Zusätzlich wurden die Abmessungen der Balkenquerschnitte so gewählt, dass das Flächenträgheitsmoment in den einzelnen Abschnitten des Simplified Shutters dem des Full-Scale Shutters entspricht. Aufgrund der Massen-Steifigkeits-Äquivalenz sind die Eigenfrequenzen beider Shutter gleich. Weiterführende Informationen und Berechnungen wurden veröffentlicht¹⁴.

Thermische und hydraulische Untersuchung des Aktuators

Es wurden weitere thermische und hydraulische Untersuchungen am Design des Shutters und Aktuators durchgeführt, um die grundsätzliche Funktionsfähigkeit dieses pneumatischen

¹⁴ Friese, S.; et al., *Aim and features of the simplified parametric mock-up of a fast shutter developed for ITER optical diagnostics*, Fusion Engineering and Design 2015 (in press)

Bauteils nachzuweisen. Die verwendeten Modelle sind sowohl für stationäre wie auch für transiente Berechnungen unter Plasma- und Ausheiz-Bedingungen geeignet. Vorgenommenen Vereinfachungen an den CAD-Daten von Shutter und Aktuator ermöglichen einen Einsatz der FE-Modelle sowohl für die thermische als auch für die hydraulische Berechnung.

Aktuator während des Plasmabetriebs

Es wird vorausgesetzt, dass die Wärmelasten nur durch den Neutronenfluss hervorgerufen werden. Mit einer Fließgeschwindigkeit von 30m/s in den Versorgungsleitungen ist eine ausreichende Kühlung des Aktuators sicherzustellen. Die größten Temperaturen treten in diesem Betriebsfall an der Spitze des Kolbens und den Befestigungen der Arme des Shutters auf. Die Temperatur des Gehäuses überschreitet bis auf den massiven vorderen Flansch in keinem Fall den Wert von 140 °C. Die folgende Abb. A22 zeigt den Temperaturverlauf im Aktuator bei geschlossenem Shutter.

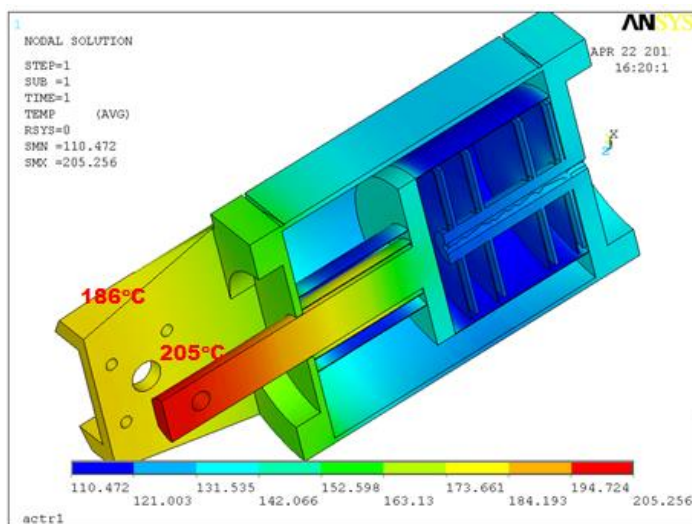


Abb. A22: Temperaturverlauf im Aktuator bei geschlossenem Shutter

Für die Untersuchung des Heliumflusses im Aktuator wurde ein ANSYS CFX Modell für stationäre und transiente Berechnungen erstellt. Der genaue Berechnungsverlauf für diesen und weitere Betriebsfälle ist in der nachfolgenden Veröffentlichung zu finden¹⁵.

Für die innere Kammer ergab die Analyse der Geschwindigkeit für den stationären Zustand, dass die max. Geschwindigkeit in den Versorgungsleitungen auftritt und an der ersten Disk, wo der Heliumstrom die Richtung ändert. Die geringste Geschwindigkeit weist der Heliumstrom in den Bellows auf, siehe Abb. A23. Weiterführende Berechnungen und Erläuterungen wurden veröffentlicht¹⁶.

15 A. Nemov et al., *Dynamic structural analysis of a fast shutter with a pneumatic actuator*, Fusion Engineering and Design **88** (2013) 2133–2137

16 K. Senik, S. Grigoriev, V. Tanchuk, I. Gornikel, Y. Krasikov, A. Panin, W. Biel and O. Neubauer, *Thermal and hydraulic performance of the helium-operated shutter protecting the first mirror of the ITER diagnostics*, Fusion Engineering and Design **88** (2013) 1288-1292

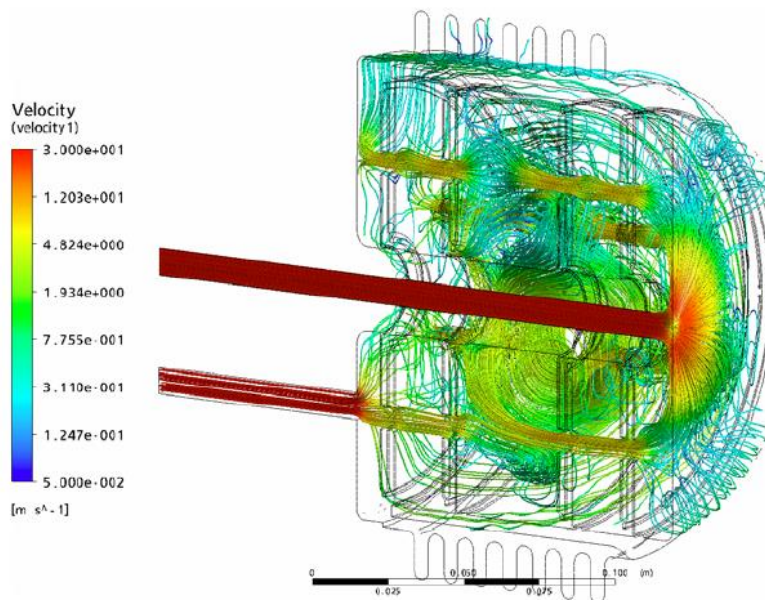


Abb. A23: Verteilung der He-Geschwindigkeit bei Rückwärtsbewegung des Kolbens

Die Untersuchungen des Heliumkreislaufes mit Hilfe des CFX-Modells bestätigen die Funktionsfähigkeit dieses pneumatischen Systems. Es zeigte sich jedoch, dass die erforderlichen Öffnungszeiten des Shutters hiermit noch nicht erreicht werden können. Hierfür ist eine Erhöhung des Drucks in den beiden Kammern des Aktuators notwendig. Des Weiteren spielt die Schaltcharakteristik des verwendeten Ventils eine entscheidende Rolle.

Spiegel und Spiegelhalter

In Zusammenarbeit mit der Industrie wurden strukturelle, thermische und hydraulische Berechnungen zu drei unterschiedlichen Varianten des ersten Spiegels und des Spiegelhalters durchgeführt. Weiterführende Informationen sind in der nachfolgenden Veröffentlichung zu finden¹⁷. Diese unterschiedlichen Varianten sind notwendig, da zurzeit noch kein einheitliches Design des Port Plugs vorhanden ist und somit mit Änderungen des Designs zu rechnen ist.

Die Oberflächentemperatur des Spiegels M1 muss zwischen 250°C und 350°C liegen, da in diesem Temperaturbereich die durch das Plasma verursachten Ablagerungen am geringsten sind. Durch die Ablagerungen verschlechtert sich die optische Qualität des Spiegels, so dass nach kurzer Zeit ein Austausch des Spiegels notwendig wird.

Die untersuchten Varianten unterscheiden sich durch die Art der Befestigung am DSM (diagnostic shielding module). Bedingt durch die unterschiedlichen Befestigungsarten erfolgt auch die Spiegeleinstellung ebenfalls nach unterschiedlichen Prinzipien. Die Untersuchungen zu diesem Thema sind in der nachfolgenden Veröffentlichung zu finden¹⁸. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Kühlung. Weitere Informationen zu Berechnung des ersten Spiegels sind in der nachfolgenden Publikation zu finden¹⁹. Bei den Varianten 1 und 2 erfolgt die Kühlung der Spiegel durch Helium. In der zweiten Variante erfolgt eine zusätzliche Kühlung des Spiegelhalters durch Wasser (s. Abb. A24).

17 Y.Krasikov, *First Mirror Design Options for the ITER cCXRS Diagnostic*, 27th Symposium on Fusion Technology, Liège, Belgium, Sep. 24-28, 2012

18 A. Krimmer et al., *Alignment Principles for ITER In-Vessel Diagnostic Mirrors*, IEEE Transactions on Plasma Science **40** (2012) 740-745

19 S. Grigoriev et al., *Thermo-hydraulic analysis of the first mirror and its cooling system for the ITER core CXRS diagnostic*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 1243 - 1247

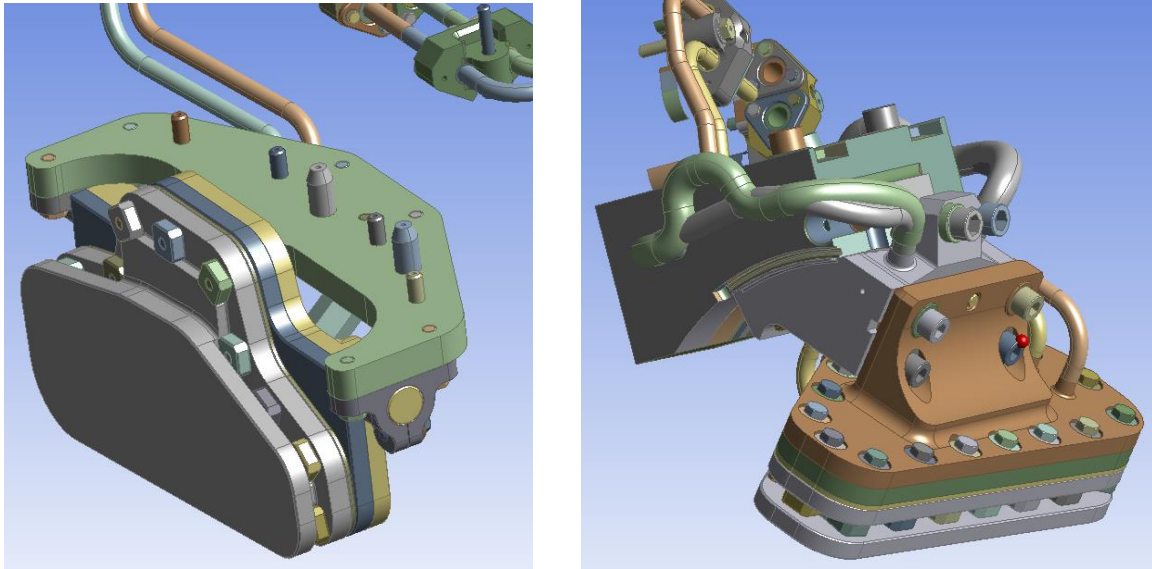


Abb. A24: Zwei unterschiedliche Varianten des ersten Spiegels und Spiegelhalters.

Ein Ziel der Untersuchungen ist die Berechnung der thermischen Verformungen des Spiegels. Hierbei dürfen bestimmte vorgegebene Grenzwerte der Verformung nicht überschritten werden. Dieses ist notwendig, um die Funktionsfähigkeit des gesamten optischen Systems nicht zu gefährden. Hierfür ist es erforderlich, den Verlauf der Kühlkanäle sowie die Fließgeschwindigkeit des Heliums zu optimieren.

Ein weiteres Ziel ist die Berechnung des Spannungszustandes während der beiden Betriebszustände „Plasma Operation“ und „Baking Operation“²⁰. Die auftretenden Spannungen dürfen hierbei die von ITER spezifizierten Grenzwerte nicht überschreiten, um die angestrebte hohe Lebensdauer von 20 Jahren zu gewährleisten.

Einen großen Einfluss auf den Spannungszustand hat die gewählte Vorspannung der Befestigungsschrauben des Spiegels am Halter. Hierdurch wird eine Zwischenschicht zwischen dem Spiegel und dem Halter, die eine einwandfreie Wärmeübertragung gewährleisten soll, elastisch verformt und soll somit in jedem Betriebszustand den vollständigen Kontakt zwischen den beiden Teilen sicherstellen. Hierfür wurde die notwendige Größe der Vorspannkraft für die Schraubverbindung untersucht. Eine zu große Vorspannkraft kann zu einer plastischen Verformung der Zwischenschicht führen und hat zur Folge, dass ein ständiger Flächenkontakt der einzelnen Komponenten für alle Betriebszustände nicht mehr gewährleistet wird.

Für beide Ziele sind umfangreiche statische und transiente FE-Berechnungen notwendig.

Die folgende Abb. A25 zeigt beispielhaft das Ergebnis der thermischen Analyse für die Variante 1 im Betriebszustand „Plasma Operation“.

Die max. Temperatur im stationären Fall beträgt 337°C. Die höchste Temperatur stellt sich an der Spitze des Spiegels ein, diese Stelle weist die kürzeste Entfernung zum Plasma auf. In dieser Simulation überschreitet die höchste Temperatur der Komponente nicht die während des Betriebs erlaubte max. Temperatur von 350°C. Die min. Temperatur des Spiegels liegt bei 327°C. Durch die Heliumkühlung, Strahlungsverluste und Wärmeleitung sinkt die Temperatur vom Spiegel in Richtung des Halters ständig ab.

²⁰ Franz Nagelstutz et al., UNTERSUCHUNG DES CXRS PORT PLUGS FÜR DEN FUSIONSREAKTOR ITER INVESTIGATION OF THE CXRS PORT PLUG FOR THE FUSION REACTOR ITER, Jahrestagung Kerntechnik, Berlin 2011

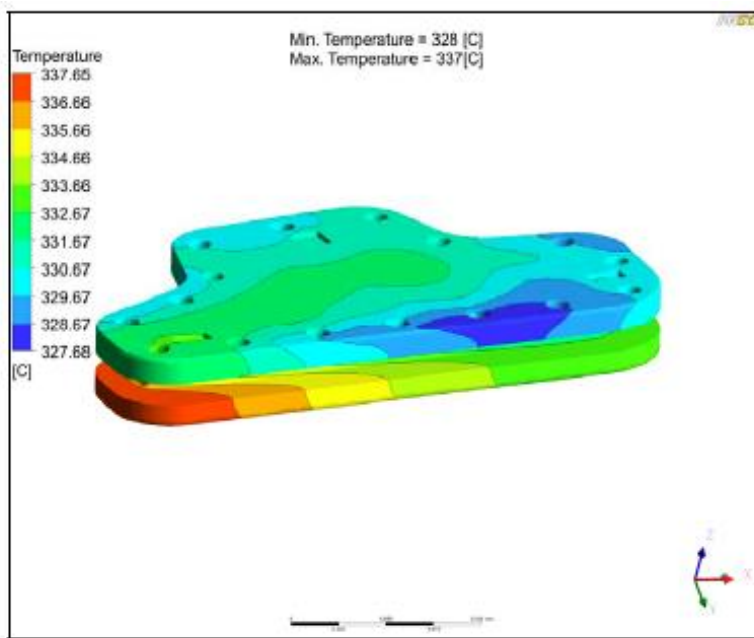


Abb. A25: Spiegeltemperatur während des Plasmabetriebs, Variante 1

Abbildung A26 zeigt den Temperaturverlauf des Kühlmittels im ersten Spiegel der Variante 1. Die Temperatur des Kühlmittels liegt bei 294°C im Einlauf und steigt auf 325°C in Auslauf an. Der Druckverlust des He-Kreislaufs zwischen Einlauf und Auslauf liegt bei -0,48 bar.

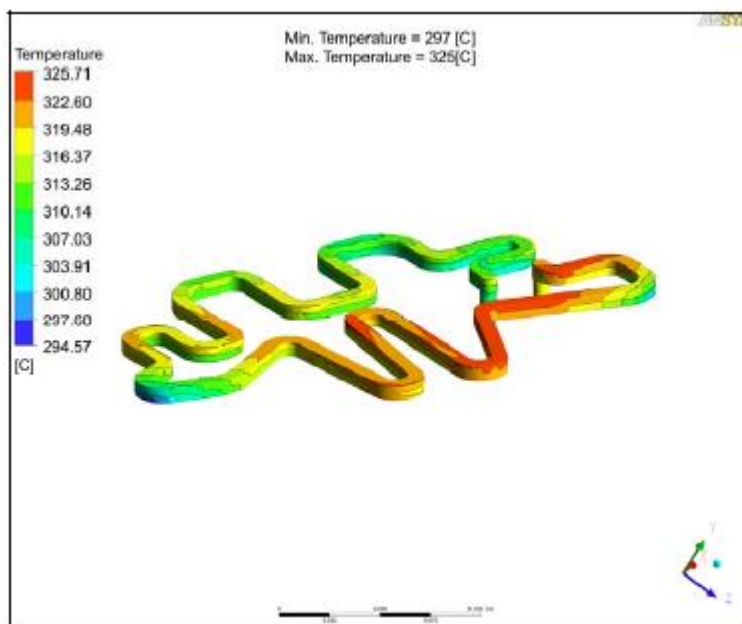


Abb. A26: Temperaturverlauf im Kühlmittel im ersten Spiegel

Abbildung A27 zeigt eine dritte Variante des Spiegelhalters mit dem ersten Spiegel. Durch die Nähe zum Plasma kann es erforderlich werden, dass sowohl der Spiegel als auch der Spiegelhalter gekühlt werden müssen.

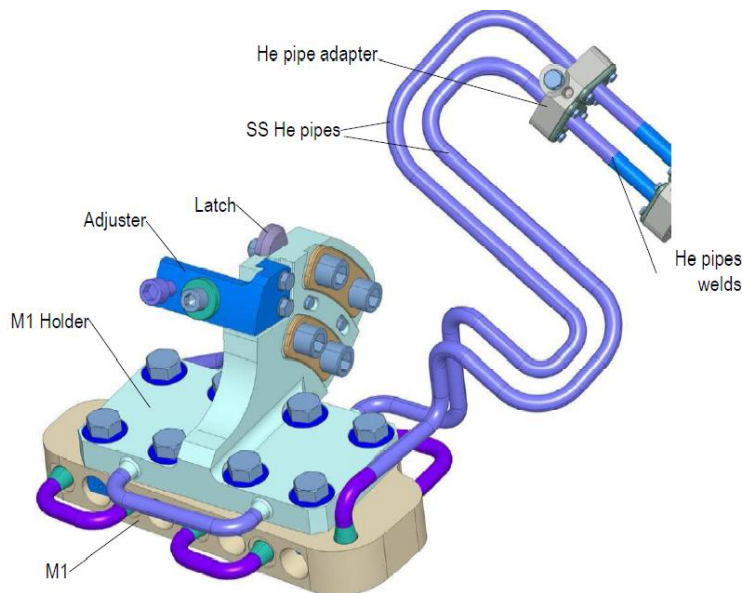


Abb. A27: Variante eines einstellbaren Spiegelhalters für den Spiegel M1 ohne elastische Zwischenschicht

Durch die Kühlung wird sichergestellt, dass die Wärmedehnung minimiert wird und somit die optischen Toleranzen für diesen Spiegel eingehalten werden. Da diese Variante keine elastische Zwischenschicht besitzt, ist es wichtig, dass der Temperaturunterschied zwischen Spiegel und Halter gering gehalten wird, um zusätzliche Verformungen durch Scherkräfte zu vermeiden.

Die Darstellung verdeutlicht auch die Schwierigkeiten bei der Anbindung der Kühlleitung an den Spiegel²¹. Die Kühlleitungen und der Spiegel bestehen aus unterschiedlichen Materialien (Stahl/Molybdän) mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Bei einer direkten Anbindung würden aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen zu große Spannungen auftreten. Deswegen werden beide Teile über ein Zwischenstück miteinander verschweißt, welches einen entsprechenden Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzt.

Schrauben und Tellerfedern werden zur Aufrechterhaltung der vorgegebenen Anpresskraft verwendet. Die Vorspannkraft der Schraubenverbindung zwischen Halter und Spiegel muss groß genug sein, um ein Abheben unter elektromagnetischer Last ausschließen zu können. Die Anpresskraft beeinflusst auch die Größe der Wärmeübertragung zwischen Spiegel und Halter.

Die nachfolgende Abb. A28 zeigt den Temperaturverlauf während des Plasmabetriebs. Die sich hierbei ergebenden Verformungen wurden für die x-, y- und z-Richtung berechnet. Die max. Verformung lag für die x-Richtung bei 48 μm und für die z-Richtung bei 182 μm . Die hieraus resultierenden mechanischen Spannungen lagen innerhalb der erlaubten Grenzen.

21 F. Giese et al., ITER – THERMISCHE, HYDRAULISCHE UND MECHANISCHE ANALYSEN DES M1 UND M1 HALTERS DER PLASMA CORE CXRS DIAGNOSTIK, Jahrestagung Kerntechnik, 14. -16. Mai 2013 Berlin

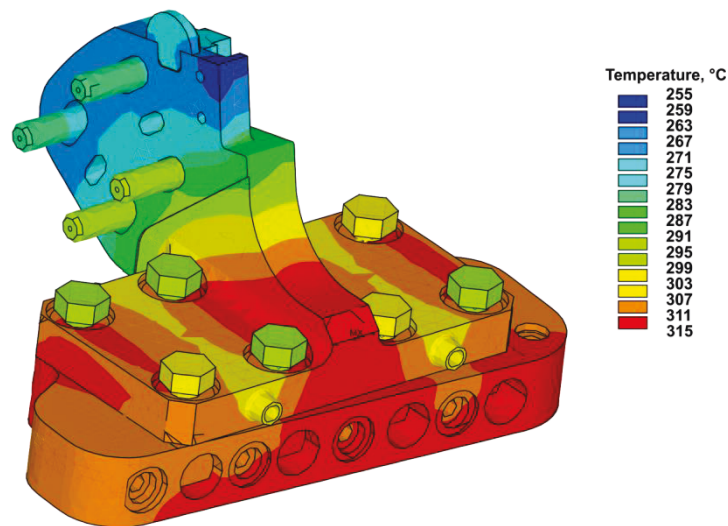


Abb. A28: Temperaturverteilung an Spiegel und Spiegelhalter

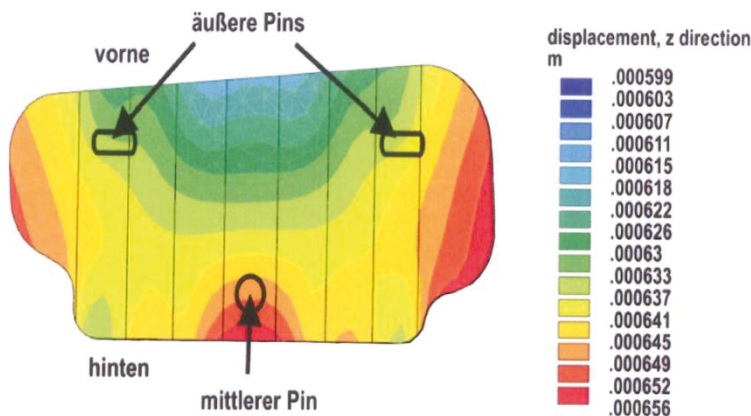


Abb. A29: Verformungen von Spiegel und Spiegelhalter infolge der Temperaturerhöhung

Abbildung A29 zeigt die ermittelten Verformungen aus dieser FEM Berechnung. Die sich aus der Temperaturerhöhung ergebenden Verformungen lagen innerhalb der in den ITER-Richtlinien erlaubten Grenzen. Für genauere Aussagen ist jedoch eine zusätzliche elastisch-plastische Berechnung notwendig.

Nach Abschluss der thermo-mechanischen Analyse wurden die einzelnen Varianten bewertet und es wurde entschieden, dass die Designvariante Nr.3 als Referenz-Design weiterverfolgt werden soll.

Neutronenberechnung einzelner Port Plug Komponenten

Neutronenberechnungen mit dem Monte-Carlo-Code MCNP stellen die heute übliche Methode dar, um die räumliche Verteilungen der Flussdichten und Energieverteilungen von Neutronen- und Gammastrahlung in nuklearen Anlagen zu berechnen und daraus die lokalen Materialschädigungen und Wärmebelastungen in der Anlage zu ermitteln. Auch für das ITER CXRS Projekt werden solche Berechnungen benötigt, um die erwarteten Lasten für alle Komponenten hinreichend genau zu bestimmen.

Zu diesem Zweck wurde ein detailliertes MCNP-Modell des Port Plugs auf der Basis der aktuellen CATIA-Modelle der einzelnen Komponenten erstellt. Anschließend wurden nukleare Simulationsberechnungen bezüglich Neutronenfluss und nuklearer Heizleistung für die einzelnen Komponenten und auch als 3D-Feld für den gesamten PP durchgeführt und

ausgewertet. Es erfolgte auch eine Berechnung der Materialschädigung für das aktuelle Modell.

Die Geometrie des CXRS Port Plug wurde hierfür modelliert und in ein vorhandenes ITER-MCNP-Modell eingebaut. Wegen der komplexen Struktur und der Notwendigkeit, kurzfristige Änderungen am Port Plug Modell durchführen zu können, wurde bereits in der Vergangenheit ein effizienter Weg für die Modellierung gesucht. Bei dieser Methode wurde ein Algorithmus entwickelt, der es erlaubt, die geometrische Konfiguration des Spiegelsystems aus elementaren Randbedingungen wie Spiegelposition und Spiegelgröße zu berechnen. Das Programm produziert daraus die von MCNP verwendeten mathematischen Oberflächenbeschreibungen und kombiniert sie mit entsprechenden Zellbeschreibungen, ohne die generelle Struktur der Inputdatei zu verändern.

Es wurden mehrere parametrische Studien durchgeführt^{22,23,24,25}. Diese beinhalten eine alternative Berechnung für unterschiedliche Spiegelmaterialien und unterschiedliche Größen des optischen Kanals. Die Kühlkanäle im ersten Spiegel sollen durch unterschiedliche Verhältnisse von Wasser und Spiegelmaterial beschrieben werden.

Die Untersuchung des Referenzdesigns beinhaltete die Berechnung des Neutronenflusses und der nuklearen Heizleistung für die einzelnen Spiegel, Spiegelhalter sowie den Shutter und Aktuator.

Die einzelnen Spiegel wurden hierbei in Form und Größe als abgeschrägte, zylindrische Zellen modelliert. Der erste Spiegel bestand bei dieser Simulation aus Molybdän, die Spiegel 2 und 3 bestanden aus Stahl SS316LN und die restlichen Spiegel aus SiO₂.

Die Berechnungen zeigten, dass der erste Spiegel, der aus Molybdän besteht, auch der höchsten Wärmebelastung ausgesetzt ist.

Wie erwartet sinken Neutronenfluss und Heizleistungswerte mit zunehmender Entfernung vom Plasma, siehe Tabelle T1.

Mirror	Position			Material	Volume [cm ³]	n-flux [n/(cm ² s)]	n-Heating [W/cm ³]	g-Heating [W/cm ³]	Heating Sum [W/cm ³]
	X	Y	Z						
	[cm]								
1	661	-15	452	Mo	1.24171E+03	4.603E+12	3.183E-03	1.677E-01	1.709E-01
2	711	0	461	SS316LN	3.27470E+03	6.241E+11	5.031E-04	1.491E-02	1.541E-02
3	703	0	428	SS316LN	2.10568E+03	5.686E+11	4.937E-04	1.452E-02	1.502E-02
4	812	-15	442	SS316LN	1.04720E+03	1.084E+10	6.203E-06	4.089E-04	4.151E-04
5	795	5	477	SS316LN	1.19078E+03	8.055E+08	1.243E-07	1.804E-05	1.816E-05
6	1027	10	518	SS316LN	1.34588E+03	3.055E+07	1.726E-08	7.127E-07	7.299E-07
7	988	-15	481	SS316LN	3.22563E+03	6.806E+07	6.283E-08	1.162E-06	1.225E-06
Beam Window	1052	0	510	CVD Diamond	4.44374E+02	1.427E+07	4.721E-08	2.162E-08	6.882E-08

Tabelle T1: Neutronenfluss und Wärmelasten der einzelnen Spiegel

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Neutronenfluss innerhalb des Port Plugs simuliert. Wie erwartet, ist der Neutronenfluss am größten im vorderen Bereich des Port Plugs (Abb. A30). Die Abbildung verdeutlicht, dass der auf die Spiegel einwirkende Neutronenfluss seinen Höchstwert am ersten Spiegel erreicht. Die Berechnungsergebnisse haben Einfluss auf die weiteren Designarbeiten, insbesondere für den Verlauf des optischen Kanals.

22 P. Bourauel et al., *Kopplung des Monte-Carlo-Codes MCNP und des Aktivierungscodes FISPACT mit automatischer Visualisierung der Simulationsergebnisse*, Int. J. Nucl. Power (atw) **54** 459 (2009)

23 P. Bourauel, *Neutronic Analysis for the ITER CXRS Diagnostic Upper Port Plug*, PhD Thesis, FZ Jülich / Univ. Bologna, 2010

24 P. Bourauel et al., *Neutronic Analysis of CXRS Port Plug diagnostic structures of ITER with newly developed software tools*, 10th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-10) 2011-09-11 - 2011-09-16 Portland, Oregon, USA

25 Bourauel, P.; et al., *Neutronics calculations for the ITER CXRS Port Plug and mirror subsystems*, 27th Symposium on Fusion Technology, Liège, Belgium, Sep. 24-28, 2012

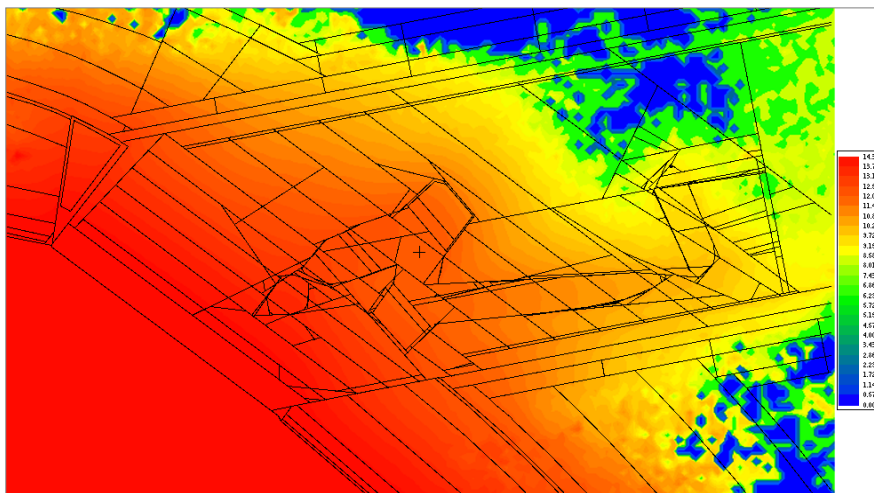


Abb. A30: Neutronenfluss an der Spitze des Port Plugs

Optische Designstudien

Der Arbeitsschritt umfasst den Entwurf und die Analyse eines optischen Systems für die CXRS Spektroskopie und wurde in Zusammenarbeit mit drei Industriepartnern durchgeführt. Es soll ein robustes Spiegelsystem entwickelt werden, das aus zwei Spiegelgruppen besteht. Bezüglich des Materials für den ersten Spiegel wurden keine Vorgaben getroffen, um auch neue Materialien in die Auswahl einbeziehen zu können.

Der maximale zulässige Eintrittspupillendurchmesser beträgt 45 mm. Diese Größe ist notwendig, um eine maximale Etendue des Systems zu erhalten. Der erste Spiegel ist hochenergetischen Teilchen aus dem Plasma ausgesetzt; um die Lebensdauer zu erhöhen, wird dieser Spiegel in einer Entfernung von 295 mm hinter der Eintrittspupille angeordnet. Um den Spiegel zu schützen, wird ein Shutter verwendet. Dies muss bei der Auslegung des optischen Systems berücksichtigt werden.

Aufgrund der geometrischen Anforderungen hat der erste Spiegel zurzeit eine bi-konische Form mit Neigungswinkel in zwei Richtungen. Dies bewirkt, dass alle Arten von optischen Fehlern durch das nachfolgende System korrigiert werden können. Das Gesamtsystem besteht aus einer vorderen Gruppe von vier Spiegeln und einer Back-End-Gruppe aus zwei Spiegeln.

Die folgenden Abbildungen A31 und A32 zeigen den prinzipiellen Aufbau des Systems. Bei dieser Lösung befindet sich eine Spiegelgruppe hinter der Vakuumbarriere. Hierdurch soll eine bessere Zugänglichkeit zu dieser Spiegelgruppe gewährleistet werden.

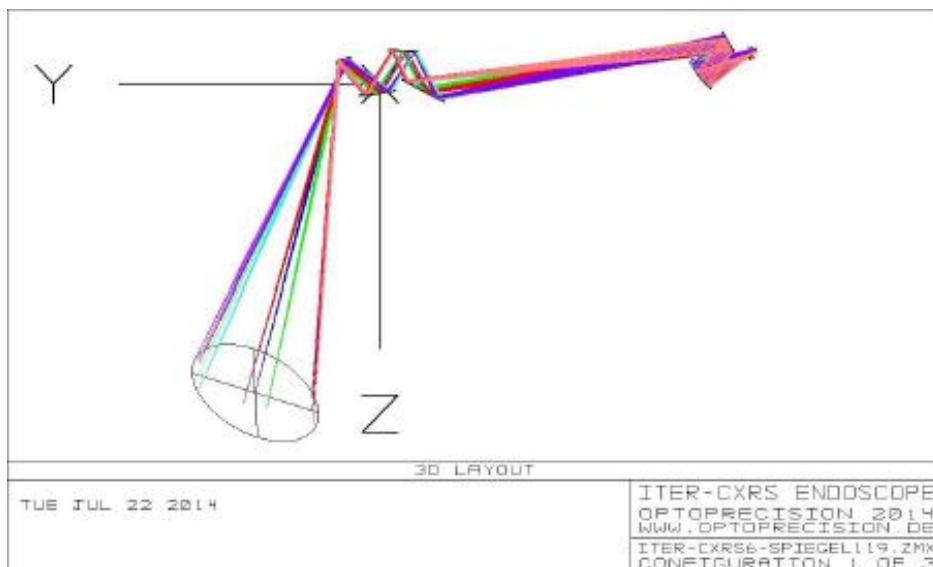


Abb. A31: Layout des optischen Systems

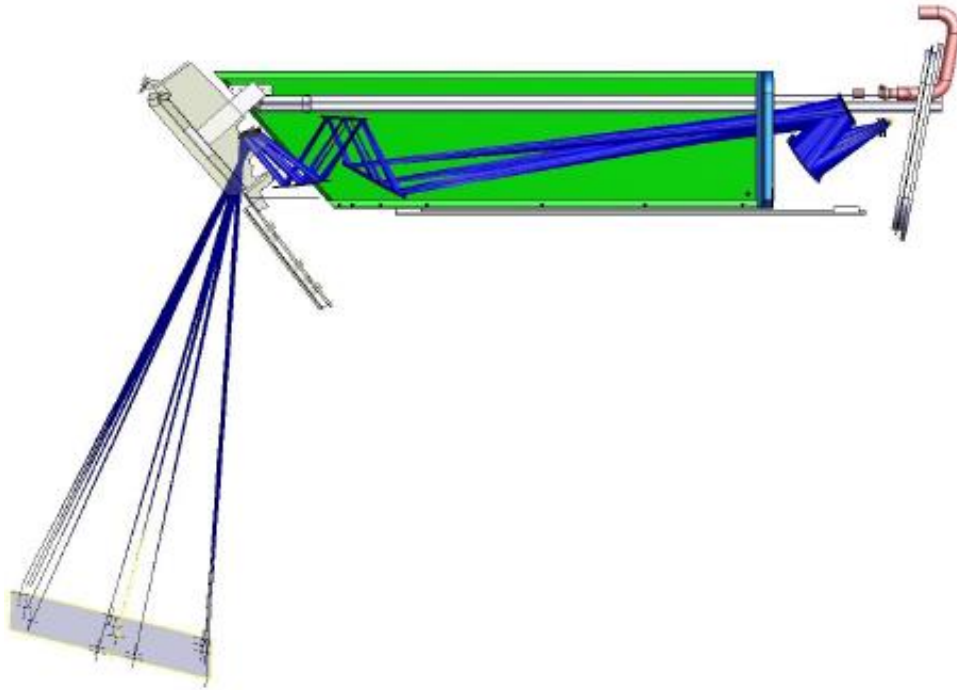


Abb. A32: Seitenansicht des optischen Systems im Port Plug

Versuche zur Herstellbarkeit von M2

Neben dem ersten Spiegel sind auch die weiteren Spiegel des optischen Labyrinths wichtig für die Funktionalität des optischen Systems. Sie befinden sich zwar etwas weiter vom Plasma entfernt, sind jedoch entscheidend für die erreichbare Abbildungsqualität. Anhand des zweiten Spiegels wurden Versuche durchgeführt zur Herstellung einer Spiegelkonstruktion mit innerhalb des Substrats liegendem Kühlmittelkanal.

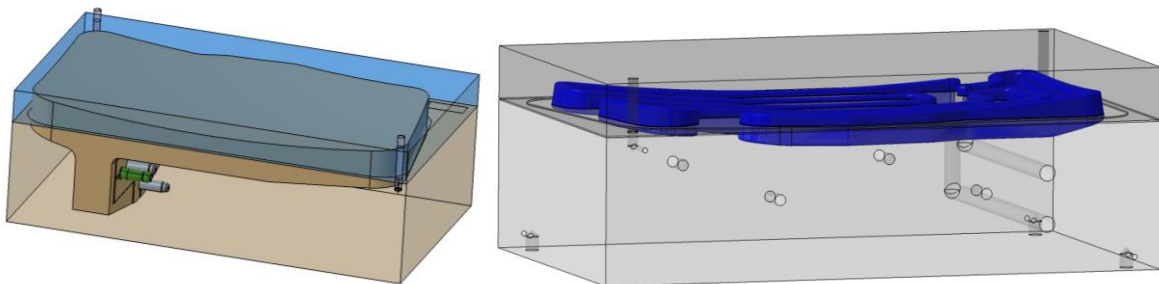
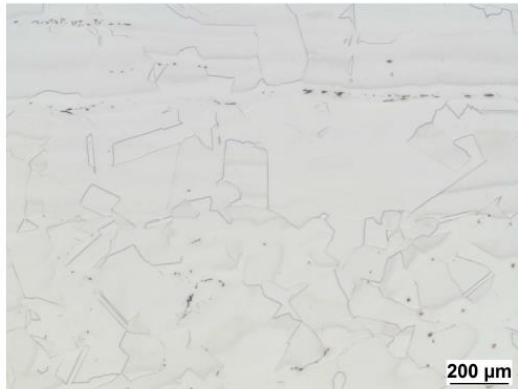


Abb. A33: Links: Lage des Spiegelsubstrats (dunkelbraun) innerhalb des Rohmaterials (260 mm x 430 mm) Rechts: Kühlmittelanal in der Trennebene des Substrats (Blau), der mittels Diffusionsschweißung gebildet werden soll.

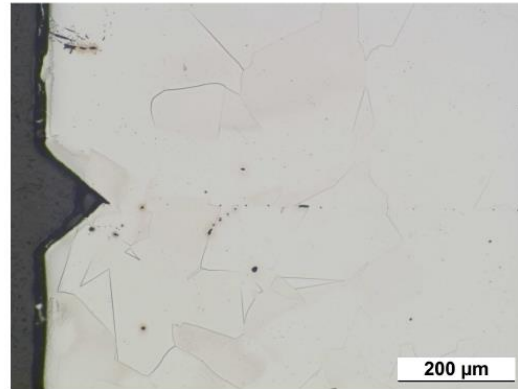
Für den Versuch wurde der zweite Spiegel (M2) von core CXRS gewählt. Dieser Spiegel weist eine toroidale Form auf mit gesteigerten Anforderungen an die Formabweichungen bei Betriebslasten. Abbildung A33 zeigt die Lage des Spiegelsubstrats innerhalb des Rohmaterials sowie den innen liegenden Kühlkanal, der durch Einfräsen in beide zu verschweißenden Platten erzeugt wird. Für die für den Spiegel benötigte flächige Schweißung wurde die Methode des Diffusionsschweißens vorgesehen, da Hartlöten für Anwendungen mit Wasserkontakt innerhalb der Bestimmungen von ITER nicht erlaubt ist. Eine Reihe von Vorversuchen zu Diffusionsschweißungen wurde durchgeführt für uniaxiales Pressen, Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) sowie einer hilfsweisen Verwendung von Elektronenstrahlschweißen zur eventuellen äußeren Abdichtung einer unvollständigen Diffusionsschweißnaht. Mittels HIP konnten dabei keine überzeugenden Ergebnisse erreicht werden, aufgrund Bildung einer Oxidschicht in der Schweißebene und fehlender Möglichkeit der Prozessüberwachung. Bei der Anwendung von Elektronenstrahlschweißen kam es zur

Bildung von Rissen in der aufgeschmolzenen Zone im Material 1.4435. Die Rissbildung konnte zwar durch Variation der Schweißparameter reduziert, jedoch nicht vollständig unterdrückt werden.

Eine vakuumdichte Diffusionsschweißung konnte nach den anfänglichen Problemen erfolgreich gezeigt werden für die Methode des uniaxialen Pressens. Der verwendete Versuchsblock aus Edelstahl 1.4435 hatte dabei die Abmessung 100 mm x 100 mm und wurde verschweißt bei 1050°C, 20 MPa über 12h. In den Schliffbildern von Abbildung A34 ist eine vollständige Verbindung mit signifikantem Kornwachstum über die Schweißfläche erkennbar. Eine Oxidschicht, eingeschlossene Verunreinigungen, oder erhöhte Restporosität sind auf den Schliffbildern nicht erkennbar. Durch die Schweißung wurde der Block um 2.2% plastisch gestaucht.



Schliffnummer: S 1340
Vergrößerung: 50 : 1
Bildnummer: 14052601_0015



Schliffnummer: S 1341
Vergrößerung: 100 : 1
Bildnummer: 14052601_0018

Abb. A34: Schliffbilder der Diffusionsschweißung des Edelstahls 1.4435 bei 1050°C, 20 MPa über 12h. Die Schweißebene liegt jeweils horizontal mittig.

Basierend auf den Ergebnissen wurde die Konstruktion des Prototyps durch die Absetzung der Schweißfläche um 1 mm leicht modifiziert, um der für die Schweißung als unvermeidlich erachteten plastischen Verformung Rechnung zu tragen. Abbildung A35 zeigt den 1:1 Prototypen mit den Abmessungen 430 mm x 260 mm in der Schweißkammer des Instituts für Mikro-Verfahrenstechnik (KIT). Die Schweißparameter betrugen nominal 20 MPa bei 1050°C über 2 h. Die Kraft wurde mehrmals während der Schweißung angepasst auf Basis des über die gemessene Verformung ausgewerteten Schweißfortschritts, siehe Abbildung A36. Die Fertigung der flächigen Schweißnaht für das Material 1.4435 konnte bei vollständiger Verschweißung mit Kornwachstum und ohne erhöhte Restporosität gezeigt werden. Eine bleibende plastische Verformung des Körpers von 1.8% wurde gemessen. Abbildung A37 zeigt Schliffe der erfolgreichen Schweißnaht.

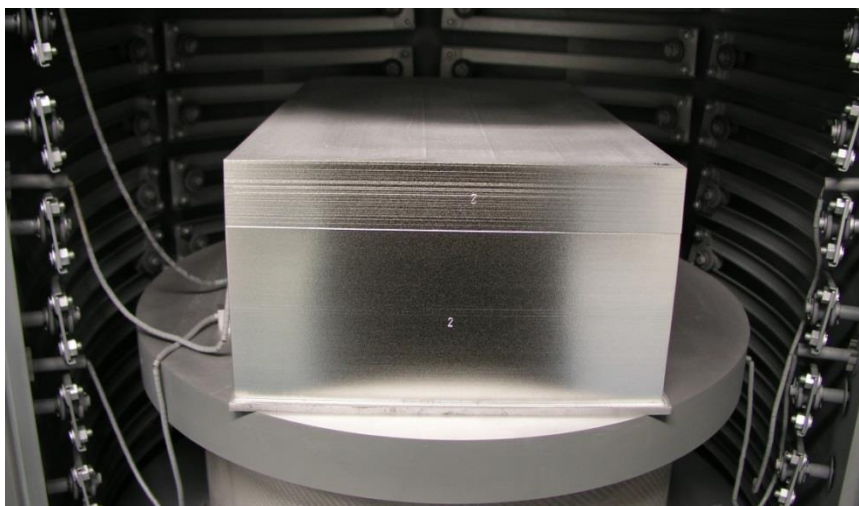


Abb. A35: Versuchsteil im Schweißofen vor der Diffusionsschweißung.

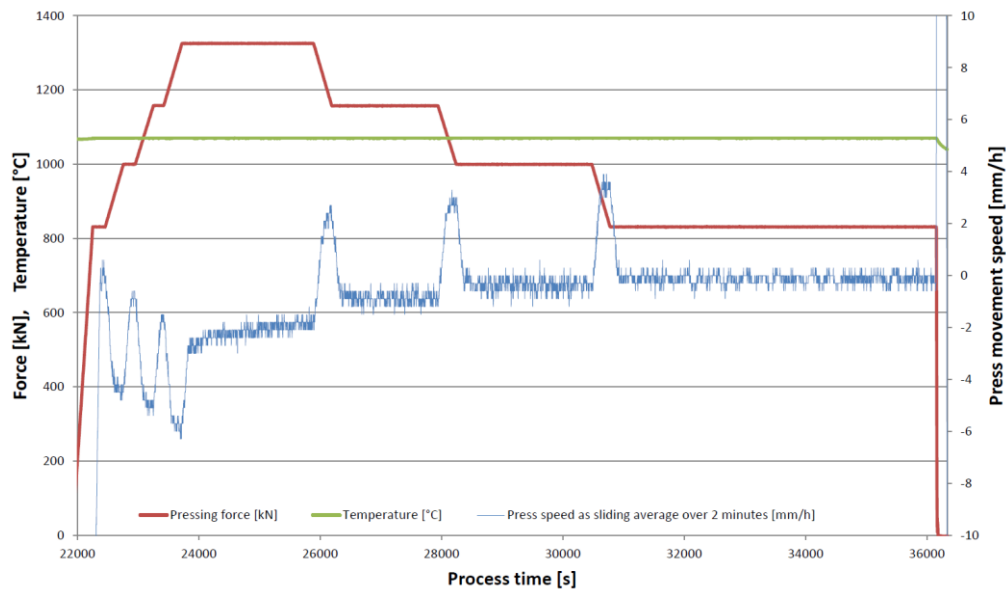


Abb. A36: Verlauf von Kraft (rot, nominale Pressfläche 66450 mm²), Temperatur (grün) und Stempelweg (blau) für den 1:1 Prototypen.

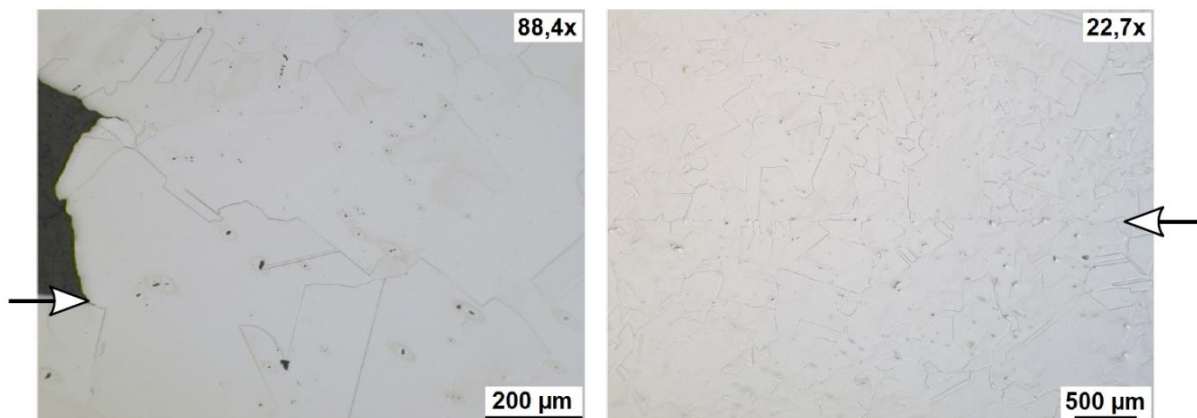


Abb. A37: Erfolgreiche Schweißung in 1.4435 am Rand des Blocks (links) und in der Mitte des für das Vakuum kritischen Querschnitts (rechts). Es ist keine erhöhte Porosität vorhanden, und ein Kornwachstum über die Schweißnaht ist sichtbar.

Untersuchung von mehrlagig dielektrisch beschichteten Spiegeln

Dielektrische Beschichtungen sind aufgrund ihrer hohen Reflexion gegenüber Metallsiegeln vorteilhaft, können aber an ITER nur sinnvoll eingesetzt werden, soweit sie den vorherrschenden thermischen Lasten sowie Pegeln ionisierender Strahlung standhalten. Über die Haltbarkeit dielektrischer Beschichtungen unter thermischen Lasten, wie sie im Betrieb von ITER auftreten, sind widersprüchliche Ergebnisse veröffentlicht und über das Verhalten auf metallischem Substrat wie von Seiten der mechanischen Auslegung bevorzugt sind keine Untersuchungen bekannt.

Für die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner mehrere Spiegel mit dielektrischer Beschichtung gefertigt. Die Beschichtung wurde dabei aufgebaut aus 32 Doppellagen in 3 einheitlichen Paketen angrenzender Wellenlänge, um interne Spannungen zu verringern und die Komplexität der Interferenz gering zu halten, mit dem Ziel eine unter den thermischen Bedingungen von ITER stabile Beschichtung zu erhalten. Untersucht wurde eine Beschichtung aus SiO₂/TiO₂ auf Edelstahlsubstrat (1.4429). Die Beschichtung war ausgelegt auf >98% gerichtete Reflexion im Wellenlängenbereich 460 bis 670 nm.

Abbildung A38 zeigt die Reflexion der Beschichtung nach Fertigung und einer Reihe von thermischen Belastungen. Die Beschichtung weist auf dem Edelstahlsubstrat eine leicht verringerte gerichtete Reflexion auf im Vergleich zum Glassubstrat aufgrund schlechterer Oberflächenqualität nach Politur.

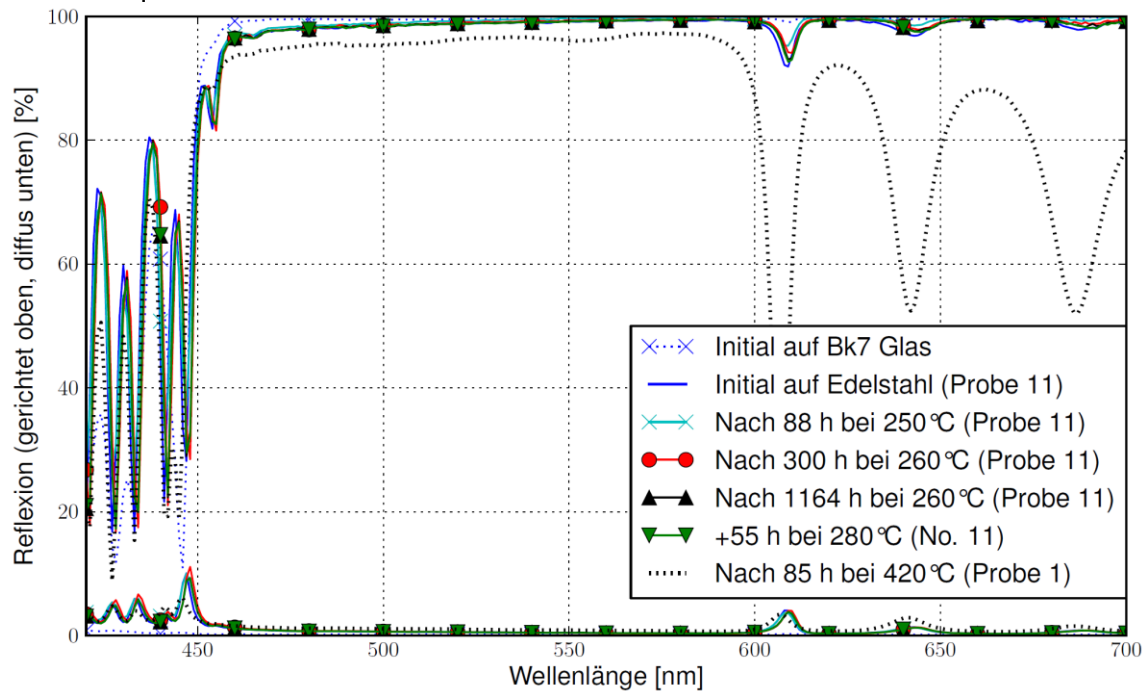


Abb. A 38: Gerichtete und diffuse Reflexion nach Fertigung und verschiedenen thermischen Lasten.

Die thermischen Versuche wurden durchgeführt unter Vakuum mit Temperaturrampen von ± 20 K/h. Abb. A39 zeigt exemplarisch einen Einschub der Vakuumkammer auf dem 2 Spiegel geheizt und gekühlt werden können. Die Temperatur wurde zentral innerhalb des Spiegelsubstrats gemessen. Bis inklusive 350°C wurde keine großen Veränderungen der Reflexion festgestellt. Dies steht im Gegensatz zu Veröffentlichungen mit ähnlichen Beschichtungen auf Glassubstrat²⁶. Erst bei einer Temperatur von 420°C ist es zur einer größeren Änderung der Reflexion gekommen, siehe Abbildung A38. Es konnte nachgewiesen werden dass bei dieser Temperatur das initial amorph vorliegende TiO₂ in eine kristalline Form (Anatas) übergegangen ist. Die für ITER notwendigen 250°C werden damit für die Beschichtung aus TiO₂/SiO₂ auf 1.4429-Substrat als generell erfüllbar eingeschätzt.

26 I. Orlovskiy et al., Fusion Engineering and Design 88 (2013) 1284-1287

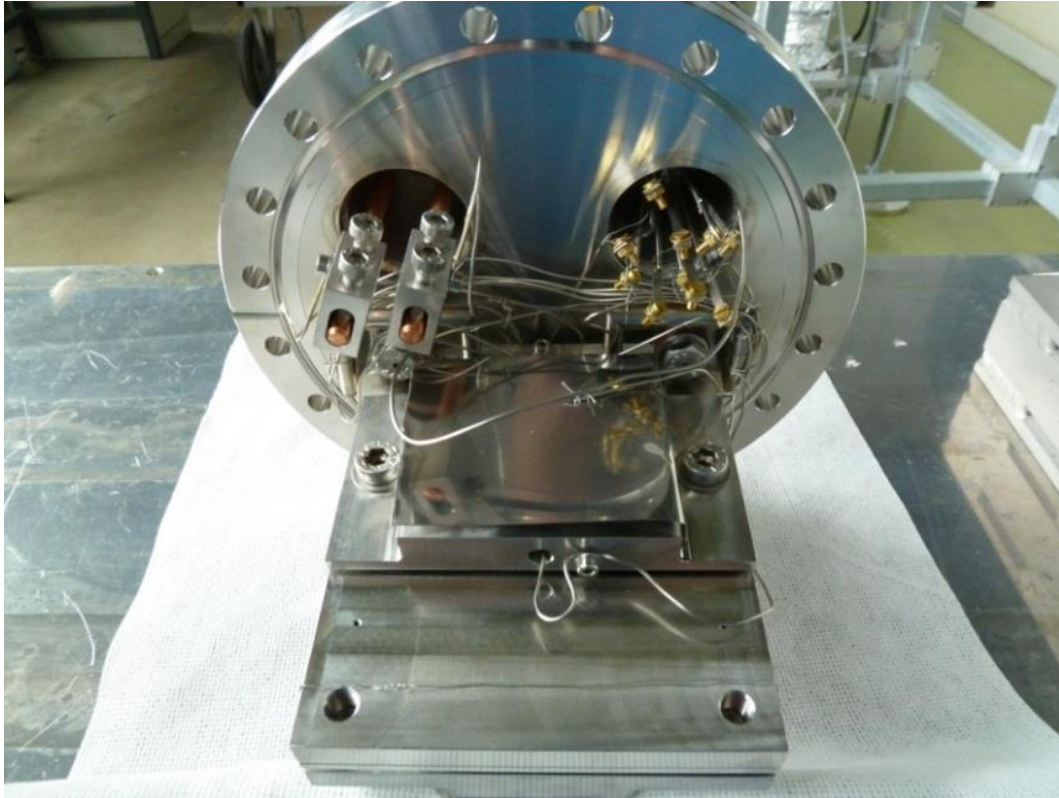


Abb. A39: Versuchsaufbau zum thermischen Belasten dielektrisch beschichteter Spiegel unter Vakuum.

Eine Beaufschlagung der Beschichtung mit Wasserdampf bei 120°C über 2 h führte nicht zu einer messbaren Schädigung.

Während der Temperaturbeaufschlagung kam es zur Bildung einzelner Blasen (blister) die im folgenden Verlauf abgeplatzt sind. Das Entstehen und Wachstum der Schadtellen ist dabei gegen Ende der Versuche zum Stillstand gekommen. Die Schäden wurden näher untersucht und es konnte nachgewiesen werden, dass die Ausbrüche bis auf das Substrat reichen, in Abb. A40 ist mittig das unter der Beschichtung liegende Edelstahlsubstrat zu sehen. Aufgrund des unter dem Lichtmikroskop vorgefundenen fortschreitenden Defektwachstums von der Mitte der späteren Ausbrüche aus wird davon ausgegangen, dass die Defektbildung am Übergang zur Beschichtung beginnt, welche damit eine nicht ausreichende Haftung aufweist. Die genauen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den nachfolgenden Veröffentlichungen erläutert^{27,28}.

27 A. Krimmer et al., Fusion Engineering and Design, **88** (2013) 2021–2024

28 A. Krimmer et al., Fusion Engineering and Design 2015 (in press)

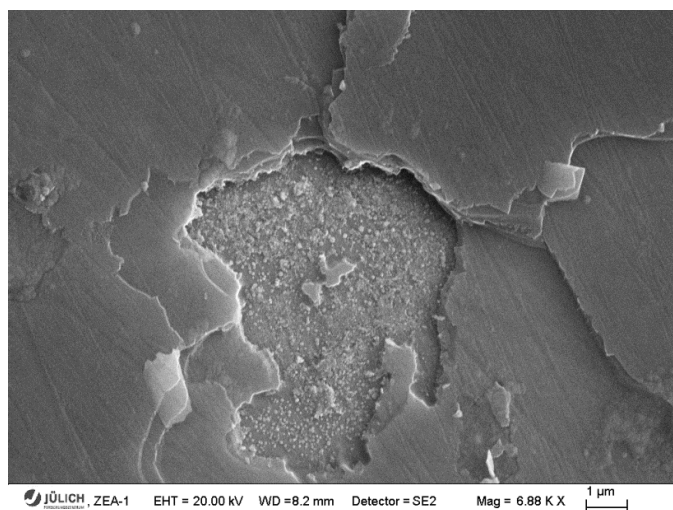


Abb. A40: REM-Aufnahme des freiliegenden Metallsubstrats am Grund eines der Ausbrüche der spiegelnden Beschichtung.

Die Haftung dielektrischer Beschichtungen kann durch Zwischenschichten zwischen Substrat und Spiegelschicht signifikant verändert werden. Um dies zu untersuchen wurden Testspiegel mit unterschiedlichen Zwischenschichten einer thermischen Belastung mit 260°C über 30 Tage ausgesetzt. Folgende Beobachtungen konnten gemacht werden mit Proben mit verringerter Zahl an Schichten:

Zwischenschicht	Ergebnis
Ohne (Vergleichsprobe zu voller Beschichtung)	Sehr viele Ausbrüche (nicht gezählt)
Cr 30 nm	Keine Beschädigungen der Beschichtung festgestellt
SiO ₂ 50 nm	5 kleine Blasen mit kleinen Anrissen aber kein Ausbruch
Mischschicht 80 zu 20%: SiO ₂ und Cr 50 nm	1 Blase und 4 kleine Ausbrüche
SiO ₂ 80 nm	1 Ausbruch

Tabelle T2: Ergebnisse der thermischen Tests von beschichteten Spiegeln mit unterschiedlichen Zwischenschichten

Aufgrund der hohen, in der Literatur beschriebenen Variabilität von dielektrischen Beschichtungen, die durch die im Versuch vorgefundenen Ergebnisse noch erweitert wurde, wird es für den Einsatz einer derartigen Beschichtung als notwendig erachtet weitergehende Versuchsteile mit der für die endgültige Diagnostik vorgesehenen Maschine zu fertigen. In den Versuchen konnte festgestellt werden, dass ein Beschichten von Edelstahl möglich ist und die Interferenz nicht stört. Probleme mit der Haftung scheinen sich durch geeignete Zwischenlagen verringern zu lassen, aber auch ohne Schicht hat die dichte der Defekte nicht ausgereicht, um zu einer messbaren Degradation zu führen. Für eine vollständige Qualifizierung von dielektrischen Spiegelbeschichtungen für den Temperaturbereich bis 260°C sind weitergehende Studien notwendig, die innerhalb des terminlichen und finanziellen Rahmens dieses Projekts nicht mehr durchgeführt werden konnten.

Vakuumtestkammer

Um einzelne Prototypen der Komponenten der CXRS Spektroskopie im Ultrahochvakuum testen zu können, wurde eine den ITER Anforderungen entsprechende große Vakuumtestkammer mit entsprechender Messtechnik aufgebaut. Zunächst sollen hierin die Hauptkomponenten Shutter und Spiegelsystem untersucht werden. Die Kammer wurde so konzipiert, dass auch weitere Komponenten oder Verfahren wie z.B. die Spiegelreinigung in ihr getestet werden können.

Die Kammer wurde ausgelegt für ein Vakuum im Bereich von 1×10^{-8} mbar und eine

Temperatur von 120 °C. Um sicherzustellen, dass dieses Vakuum erreicht wird, muss die Kammer ausgeheizt werden. Dieses geschieht durch Heizmanschetten, die außen an der Kammer befestigt werden. Die Heizleistung beträgt 15 kW. Erste Tests mit der Kammer haben ergeben, dass dieses Vakuum erreicht werden kann und auch über mehrere Stunden gehalten wird. Die Kammer verfügt über drei ölfreie Pumpsysteme, jeweils bestehend aus Vorpumpen und Turbomolekularpumpe, um in einem vertretbaren kurzen Zeitraum das notwendige Ultrahochvakuum aufbauen zu können.

Die Kammer und die CF-Flansche wurden aus 304L gefertigt, Rohre und Kammerbauteile aus 1.4301. Die Oberflächen sind glasperlfeingestrahlt. Die He-Leckrate der Schweißnähte ist kleiner als 10^{-9} mbar l/s. Der Kammerzylinder ist zweigeteilt, um zu einem späteren Zeitpunkt Erweiterungen vornehmen zu können. Der Durchmesser der Kammer beträgt 1200 mm und die Länge 3000 mm. Die großen Kammerflansche sind mit einer Doppeldichtung mit Zwischenabsaugung ausgestattet.

Die Kammer besitzt insgesamt 23 Flanschabgänge mit DN250CF, durch diese sollen die zu untersuchenden Komponenten beobachtet werden.

Insgesamt wird mit Ausheizen eine Abpumpzeit vom ca. 12 Stunden bis in den Bereich von 10^{-8} mbar erzielt.

Die Kammer ist mit einem Schienensystem und drei verfahrbaren Schlitten ausgerüstet. Auf diesen sollen später die Prototypen außerhalb der Kammer aufgebaut und dann in die Vakuumkammer eingefahren werden. Zum Probentransport außerhalb der Kammer dient ein Scherenhubwagen. Die nachfolgenden Bilder A41 und A42 zeigen den Status der Kammer beim Abnahmetest durch den Hersteller im Forschungszentrum Jülich.

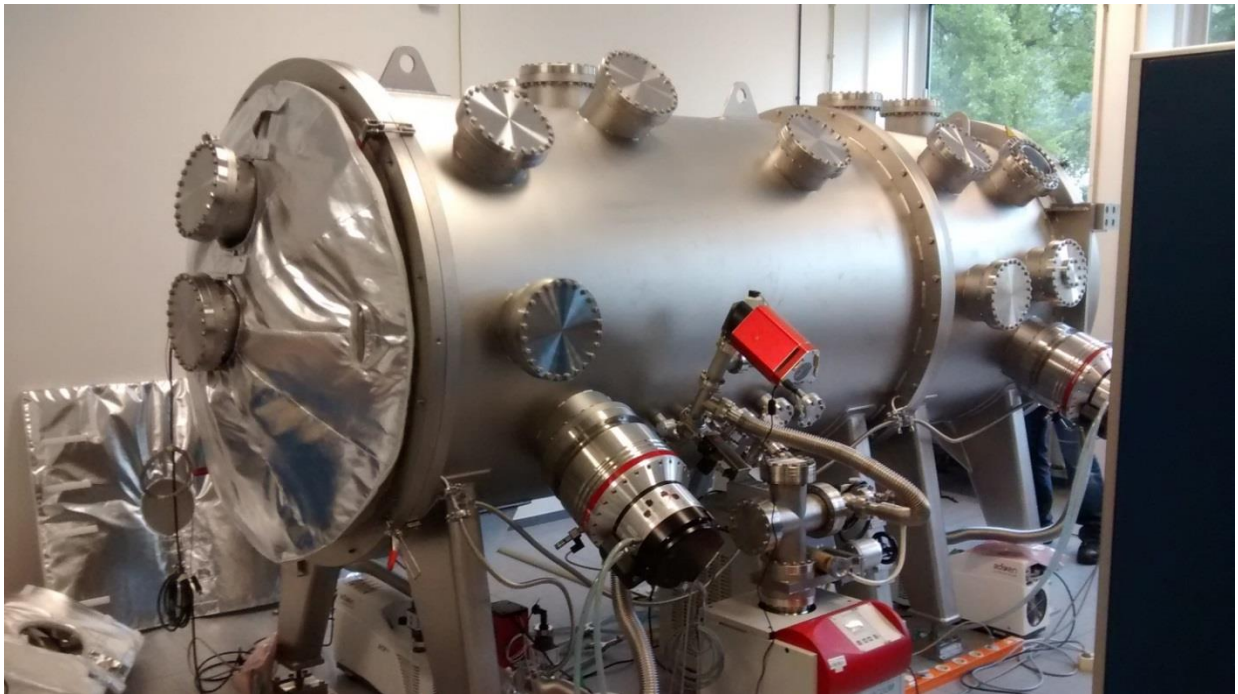


Abb. A41: Vakuumkammer für die Tests an Prototypen der CXRS Spektroskopie

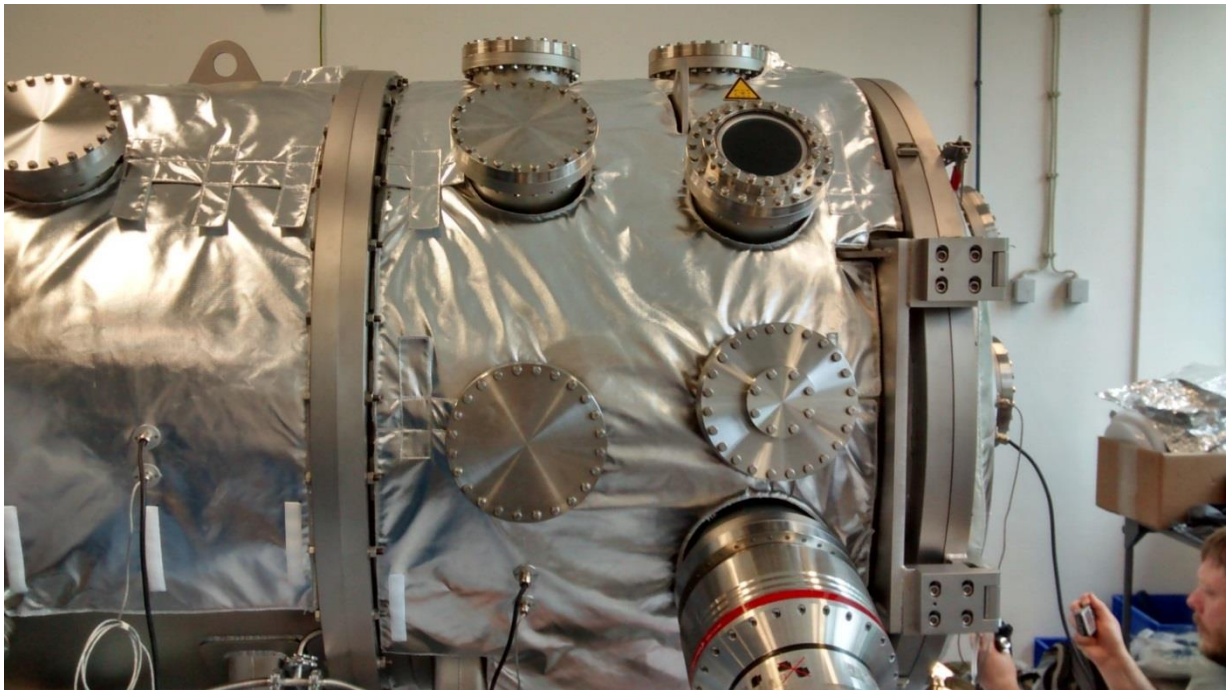


Abb. A42: Vakuumkammer mit Heizmatten

Der erste Prototyp, der in der Kammer getestet werden sollte, ist der Shutter der CXRS-Spektroskopie. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Position des Shutters in der Kammer und die für die Messungen vorgesehenen Flansche. Die weiteren Flansche sind für die Tests an den anderen Komponenten vorgesehen.

Zuerst soll das Schwingungsverhalten der Shutterarme und das Einfallen der Arme in die Bumper im Vakuum untersucht werden. Hierfür wurden sieben Positionen am gesamten Shutter definiert, an denen von außen über Lasermikrometer die Verformungen gemessen werden sollen. Zusätzlich sollen über zwei schnelle Kameras die Bewegungen aufgezeichnet werden.

Die nachfolgende Abb. A43 zeigt die für die Messtechnik vorgesehenen Flansche.

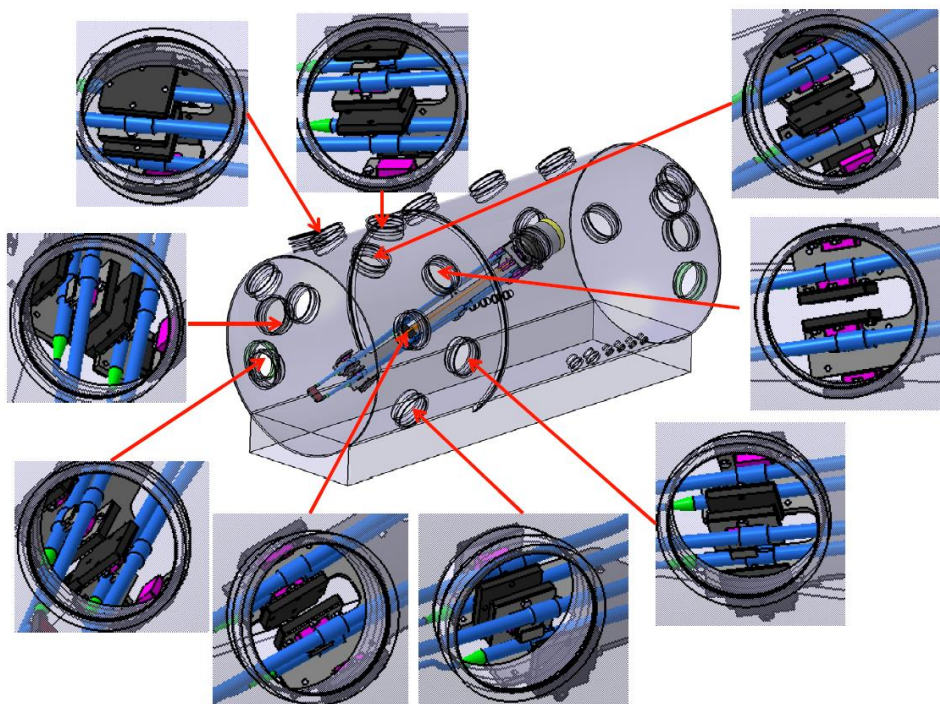


Abb. A43: Flansche zur Beobachtung der unterschiedlichen Messpunkte

Temperaturmessungen am Shutter

Um den Ausheizvorgang des Shutters zu simulieren, wird dieser mit einem hierfür beschafften Heißwasser-Drucksystem bei 230 °C und 40 bar betrieben und die Temperaturverteilung im Shutter wird mit Hilfe einer Infrarot-Kamera gemessen. Die nachfolgende Abb. A44 zeigt den an das Heißwassersystem angeschlossenen Shutter vor der Vakuumkammer.

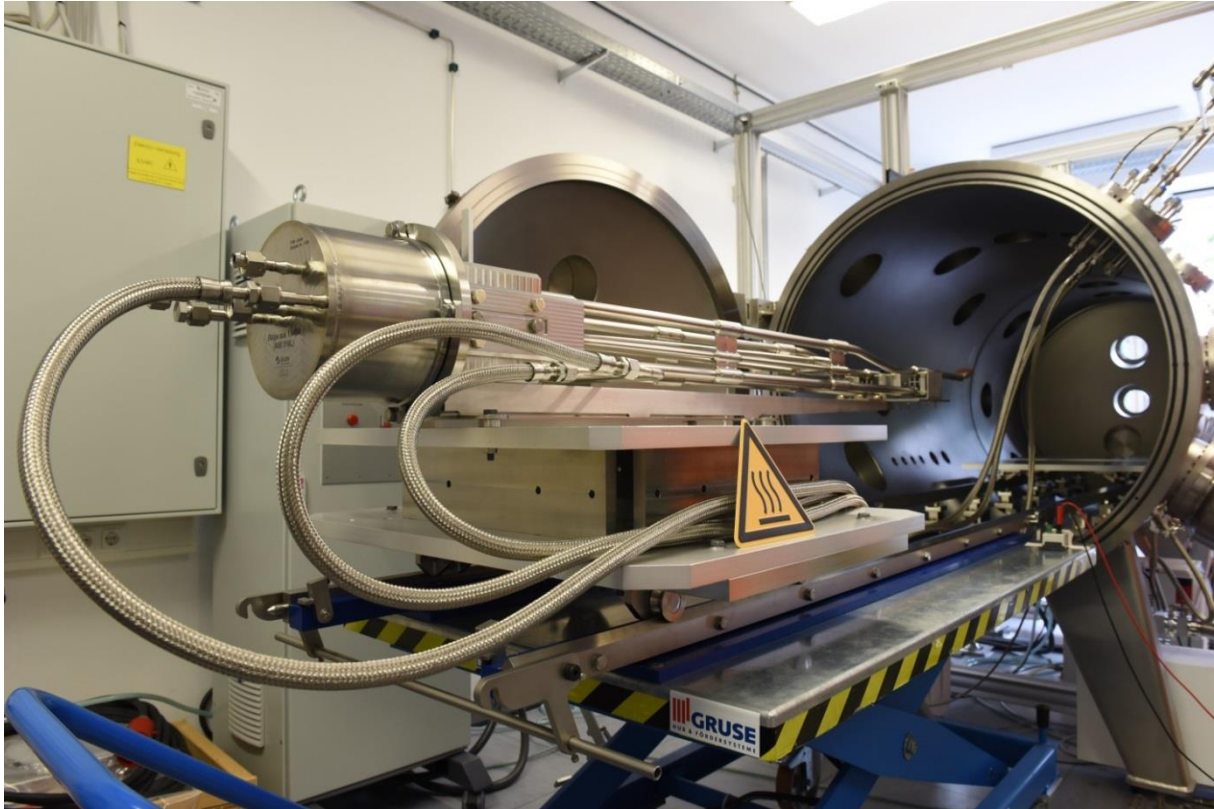


Abb. A44: Shutter angeschlossen an das Heißwassersystem

Die nachfolgende Abb. A45 zeigt einen Blick auf die von IR-Kameras gemessene Temperaturverteilung im hinteren Teil des Shutters mit Wasseranschlüssen und dem Aktuator. Deutlich sind der Zu- und Abfluss des Heißwassers in den Schläuchen und die Verteilung im Shutter zu erkennen.

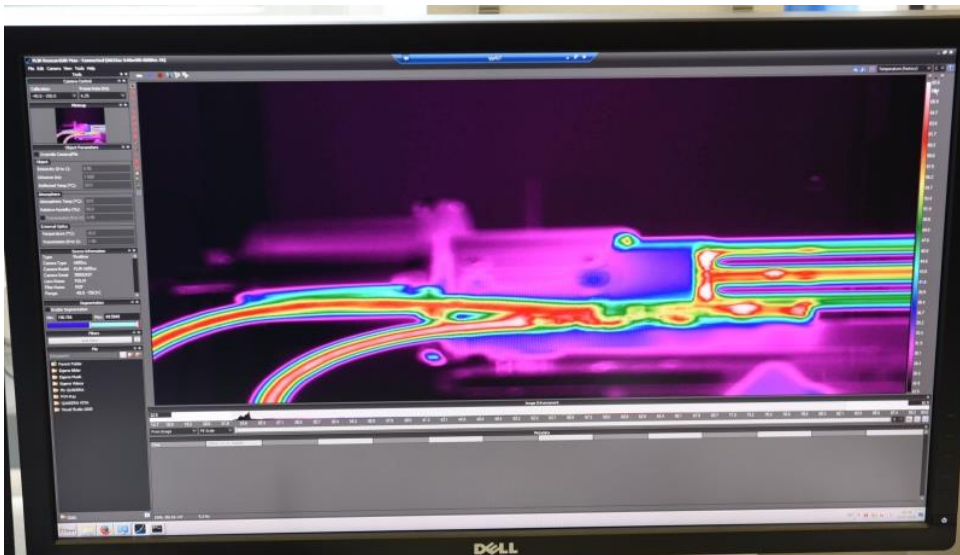


Abb. A45: Gemessene Temperaturverteilung im Shutter

Abbildung A46 zeigt die Temperaturverteilung in den Shutter Blades. Da die Oberfläche der Shutter Blades als Diffusor für die Kalibrierung der CXRS Diagnostik verwendet wird, muss hier eine gleichmäßige Temperaturverteilung sichergestellt werden.

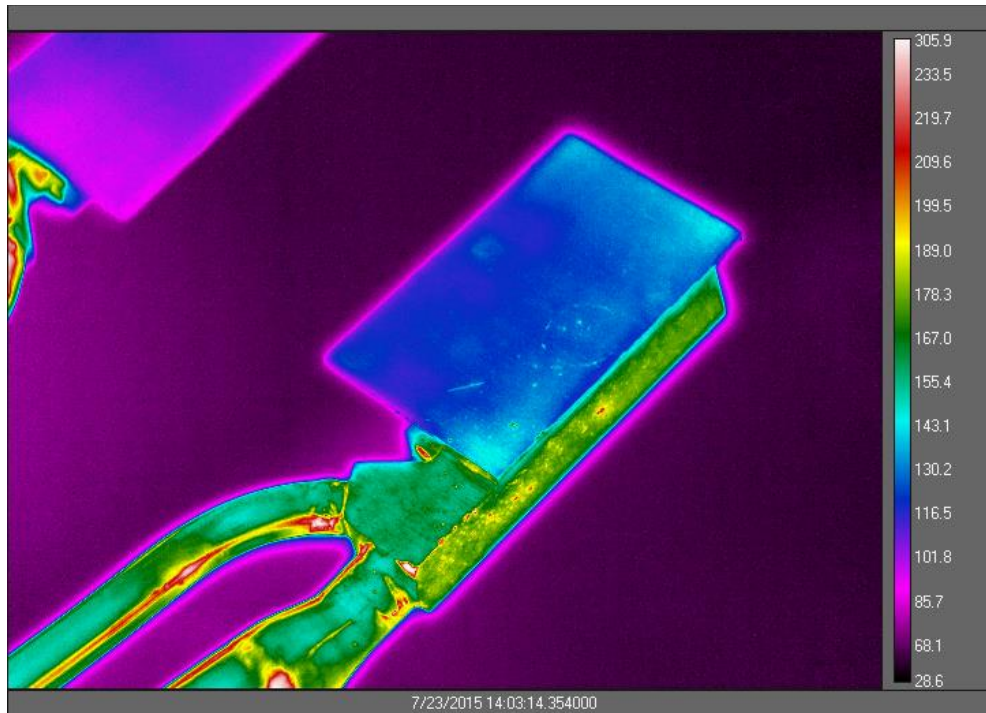


Abb. A46: Gemessene Temperaturverteilung in den Shutter Blades

Die hier dargestellten exemplarischen Ergebnisse von Experimenten mit Prototyp-komponenten zeigen, dass zum Projektabschluss die volle Funktionalität der Testkammer und der zugehörigen Messeinrichtungen erreicht wurde. Für die Zukunft sind weitere Untersuchungen von Prototyp-Komponenten, z.B. im Rahmen des FPA mit F4E, geplant, insbesondere:

- Schwingungsuntersuchungen an den Shutter-Armen
- Tests verschiedener Materialien für die Bumper
- Untersuchungen der Reflektivität verschiedener Materialien für Spiegel unter Vakuum- und Temperatureinfluss
- Untersuchungen zur Verformung der Spiegeloberfläche unter Vakuum- und Temperatureinfluss
- Tests unterschiedlicher Spiegelgruppen
- Test des Kalibrierungssystems
- Tests zur Spiegelreinigung

2. Veröffentlichungen der Ergebnisse

O. Neubauer and S. Sadakov, *Design concepts for the ITER CXRS Port Plug*, Jahrestagung Kerntechnik, Dresden 2009

S. Sadakov, W. Biel, M. von Hellermann, Yu. Krasikov, O. Neubauer, A. Panin, *Selected Design Solutions for the Integration of the CXRS Diagnostic into ITER Upper Port Plug No. 3*, Fusion Science and Technology 56 134 (2009)

S. Sadakov, T. Baross, W. Biel, V. Borsuk, N. Hawkes, M. von Hellermann, P. Gille, G. Kiss, J. Koning, M. Knaup, F. Klinkhamer, Yu. Krasikov, A. Litnovsky, O. Neubauer, A. Panin, *Conceptual design of the ITER upper port plug for charge exchange diagnostic*, Fusion Engineering and Design 84 1671 (2009)

J.Koning, R.Jaspers, D.Doorink, B. Ouwehand, F.Klinkhamer, B.Snijders, S.Sadakov, C.Heemskerk, *Maintenance implications of critical components in ITER CXRS upper port plug design*, Fusion Engineering and Design 84 (2009) Pages 1091–1094

Harald Greza, Jörg Wolters, Olaf Neubauer, *THERMISCHE UND MECHANISCHE AUSLEGUNG DER ITER PLASMA CORE CXRS DIAGNOSTIK*, Annual Meeting on Nuclear Technology, 2009-05-12 - 2009-05-14 Dresden, Germany

P. Bourauel, R. Nabbi, W. Biel und R. Forrest, *Kopplung des Monte-Carlo-Codes MCNP und des Aktivierungscodes FISPACT mit automatischer Visualisierung der Simulationsergebnisse*, et al., Int. J. Nucl. Power (atw) 54 459 (2009)

P. Bourauel, *Neutronic Analysis for the ITER CXRS Diagnostic Upper Port Plug*, PhD Thesis, FZ Jülich / Univ. Bologna, 2010

M. v. Hellermann et al., *Active beam spectroscopy for ITER*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, A623 (2010) 720,

O. Neubauer, Forschungszentrum Jülich: *Konstruktion von Plasmabeobachtungssystemen für das internationale Fusionsexperiment ITER*, Ingenieurspiegel Vol.4/2010 (2010) 79-80

A. Nemov et al., *Detailed structural analyses for ITER core CXRS port plug components based on 3d electromagnetic transient simulation*, 26th Symposium on Fusion Technology, Porto, Portugal Sep. 27-Oct.1, 2010

D. Castano Bardawil, *Core CXRS Diagnostic Retractable Tube Concept Design for ITER*, Masterarbeit FH Aachen-Jülich, 2010

W. Biel et al., *Overview on R&D and design activities for the ITER core CXRS diagnostic system*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 548 - 551

A. Krimmer et al., *Alternative system design concepts for the ITER cCXRS upper port plug front end*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 1306 - 1309

A. Panin et al., *Electromagnetic modeling and subsequent structural analysis for ITER core CXRS upper port plug diagnostic structure*, Fus. Engin. and Design (86) 2011, 2016 – 2020

Yu. Krasikov et al., *Development of design options for the port plug components of the ITER core CXRS diagnostic*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 2055 – 2059

F. Klinkhamer et al., *Optimization of the availability of the core CXRS diagnostics for ITER*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 1174 - 1177

- J. Koning et al., *Feasibility of Upper Port Plug tube handling*, Fusion Engineering and Design 86 (2011), 2060–2063
- S. Grigoriev et al., *Thermo-hydraulic analysis of the first mirror and its cooling system for the ITER core CXRS diagnostic*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 1243 - 1247
- A. Belov et al., *Electromagnetic transient simulation using a shell approach for ITER CXRS upper port plug due to plasma vertical displacement events*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 1920 - 1923
- P. Bourauel, R. Nabbi, W. Biel, *Neutronic Analysis of CXRS Port Plug diagnostic structures of ITER with newly developed software tools*, Fusion Engineering and Design **86** 2011, Pages 548–551
- H. Greza, R. Knauff, O. Neubauer, J. Wolters, G. Offermanns, W. Biel, *THERMISCHE UND MECHANISCHE AUSLEGUNG DER PLASMA CORE CXRS DIAGNOSTIK DES ITER KERNFUSIONSREAKTORS*, Jahrestagung Kerntechnik, Berlin 2011
- Franz Nagelstutz, Christine Vollrath, David Simek, Than-Hai Ung-My, Anatoly Panin, Yuri Krasikov, Olaf Neubauer, *UNTERSUCHUNG DES CXRS PORT PLUGS FÜR DEN FUSIONSREAKTOR ITER INVESTIGATION OF THE CXRS PORT PLUG FOR THE FUSION REACTOR ITER*, Jahrestagung Kerntechnik, Berlin 2011
- T. Wong, *Design of a vacuum chamber for testing components of the ITER cCXRS diagnostic*, Masterarbeit 2011
- A. Krimmer et al., *Alignment Principles for ITER In-Vessel Diagnostic Mirrors*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 40, NO. 3, MARCH 2012, 740 - 745
- A. Panin, W. Biel, Y. Krasikov, O. Neubauer and D. Bardawil, *STRUCTURAL ANALYSIS OF A PROTOTYPE FAST SHUTTER FOR ITER cCXRS DIAGNOSTIC*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 40, NO. 3, MARCH 2012, 746 - 752
- Y. Krasikov, *First Mirror Design Options for the ITER cCXRS Diagnostic*, 27th Symposium on Fusion Technology, Liège, Belgium, Sep. 24-28, 2012
- Bourauel, P.; Rohmen, S.; Nabbi, R.; Biel, W., *Neutronics calculations for the ITER CXRS Port Plug and mirror subsystems*, 27th Symposium on Fusion Technology, Liège, Belgium, Sep. 24-28, 2012
- F. Giese, H. Greza, O. Neubauer, W. Biel, *ITER – THERMISCHE, HYDRAULISCHE UND MECHANISCHE ANALYSEN DES M1 UND M1 HALTERS DER PLASMA CORE CXRS DIAGNOSTIK*, Jahrestagung Kerntechnik, 14. -16. Mai 2013 Berlin
- Neubauer, O.; Panin, A.; Giesen, B.; *APPROACHES TO NUMERICAL MODELING IN THE DEVELOPMENT PROCESS OF COMPLEX STRUCTURES FOR FUSION DEVICES*, 25th Symposium on Fusion Engineering, 2013-06-10 - 2013-06-14, San Francisco, California
- K. Senik, S. Grigoriev, V. Tanchuk, I. Gornikel, Y. Krasikov, A. Panin, W. Biel and O. Neubauer, *Thermal and hydraulic performance of the helium-operated shutter protecting the first mirror of the ITER diagnostics*, Fusion Engineering and Design **88** (2013) 1288-1292
- A. Nemov, A. Panin, A. Borovkov, M. Khovayko, E. Zhuravskaya, Yu. Krasikov, W. Biel and O. Neubauer, *Dynamic structural analysis of a fast shutter with a pneumatic actuator*, Fusion Engineering and Design **88** (2013) 2133–2137

T. Baross, W. Biel, A. Krejczinger, Yu. Krasikov and A. Panin, *Retractable tube design issues in ITER CXRS UPP #3*, Fusion Engineering and Design 88 (2013) 1352-1356

David Antonio Castaño Bardawil, Yury Krasikov, Anatoly Panin, Olaf Neubauer, Wolfgang Biel, *Fast shutter concepts for the new ITER core CXRS upper port plug baseline considering the actuator located inside and outside the port plug*, Fusion Engineering and Design 88 (2013) 2073-2076

Anatoly Panin, Yury Krasikov, Wolfgang Biel, Olaf Neubauer, *Approaches to multifield numerical analysis for components of the ITER core CXRS upper port plug diagnostics*, Fusion Engineering and Design 88 (2013) 2015-2020

A. Krimmer, G. Kassek, H.J. Allelein, Yu. Krasikov, O. Neubauer, *Design and testing of secondary mirrors for the core CXRS diagnostic system in ITER*, Fusion Engineering and Design, 88 (2013) 2021–2024

Mertens, Ph.; Castaño-Bardawil, D.; Biel, W.; Friese, S.; Hawkes, N.; Jaspers, R.; Kotov, V.; Krasikov, Y.; Krimmer, A.; Litnovsky, A.; Marchuk, O.; Neubauer, O.; Offermanns, G.; Panin, A.; Pokol, G.; Schrader, M.; Samm, U., *Status of the R&D activities to the design of an ITER core CXRS diagnostic system*, in Press, Fusion Engineering and Design (2015)

Castaño-Bardawil, D.A.; Mertens, P.; Offermanns, G.; Behr, W.; Hawkes, N.; Krasikov, Y.; Biel, W.; Samm, U. *Design overview of the ITER core CXRS fast shutter and manufacturing implications during the detailed design work*, in Press, Fusion Engineering and Design (2015)

Friese, S.; Panin, A.; Krasikov, Y.; Biel, W.; Mertens, P.; Neubauer, O., *Aim and features of the simplified parametric mock-up of a fast shutter developed for ITER optical diagnostics*, in Press, Fusion Engineering and Design (2015)

Grigoriev, S.; Tanchuk, V.; Senik, K.; Gornikel, I.; Krasikov, Y.; Mertens, Ph.; Neubauer, O.; Panin, A., *Thermal analysis for optimization of the optical duct of the ITER core CXRS diagnostics*, Fusion Engineering and Design 2015 (in press)

Krasikov, Yu.; Panin, A.; Biel, W.; Krimmer, A.; Litnovsky, A.; Mertens, Ph.; Neubauer, O.; Schrader, M., *MAJOR ASPECTS OF THE DESIGN OF A FIRST MIRROR FOR THE ITER CORE CXRS DIAGNOSTICS*, in Press, Fusion Engineering and Design (2015)

Krimmer, A.; Allelein, H.J.; Mertens, Ph.; Neubauer, O.; Orlovskiy, I.; Rosenthal, E., *Testing of SiO₂ / TiO₂ coating on a stainless steel substrate under ITER in-port conditions*, conference, in Press, Fusion Engineering and Design (2015)

Panin, A.; Khovayko, M.; Krasikov, Y.; Nemov, A.; Biel, W.; Mertens, P.; Neubauer, O., *Dynamic performance of frictionless fast shutters for ITER: numerical and analytical sensitivity study for the development of a test program*, in Press, Fusion Engineering and Design (2015)

Schrader, M.; Biel, W.; Mertens, Ph.; Krasikov, Yu.; Offermanns, G.; Remmel, J.; Volker, K.-U. *HIP-Welding tests for the molybdenum 1st mirror of CXRS-Spectroscopy*, Poster Presentation, 28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastián, Spain, 29.9.-3.10.2014

Patentanmeldung:

Y. Krasikov, O. Neubauer, D. Bardawil, *Frictionless double acting linear actuator*, Europäisches Patent EP2616692; Deutsche Patentanmeldung 102010045437.0 vom 24. Sept. 2010

Unterthema b):

Entwicklung eines Roboters für das Laser-Schweißen von Vakuumdichtungen und Rohrleitungen am Port Plug

1. Aufgabenstellung

Am ITER sind 18 Port Plugs geplant, die mehrfach geöffnet und wieder verschlossen werden müssen. Hierzu wird eine verlässliche und reproduzierbare Verschlusstechnologie gesucht. Grundsätzlich kämen dafür verschiedene Möglichkeiten in Betracht, eine Schraublösung mit metallischer Dichtung oder eine schweißtechnische Lösung, deren Ausführung und Eignung noch hinreichend nachgewiesen werden muss. Da Zuverlässigkeit und (nukleare) Sicherheit bei ITER höchste Priorität haben, kommt dort eine Schraublösung mit metallischer Dichtung nicht in Frage, sondern es wird vielmehr eine Schweißlösung mit doppelter Naht angestrebt. Hierbei sollen 2mm dicke Bleche als Dichtlippen zum Einsatz kommen, die mehrfach verschweißt und wieder geöffnet werden müssen. Eine geeignete Schweiß- und Trenntechnologie sollte in diesem Teilvorhaben entwickelt werden.

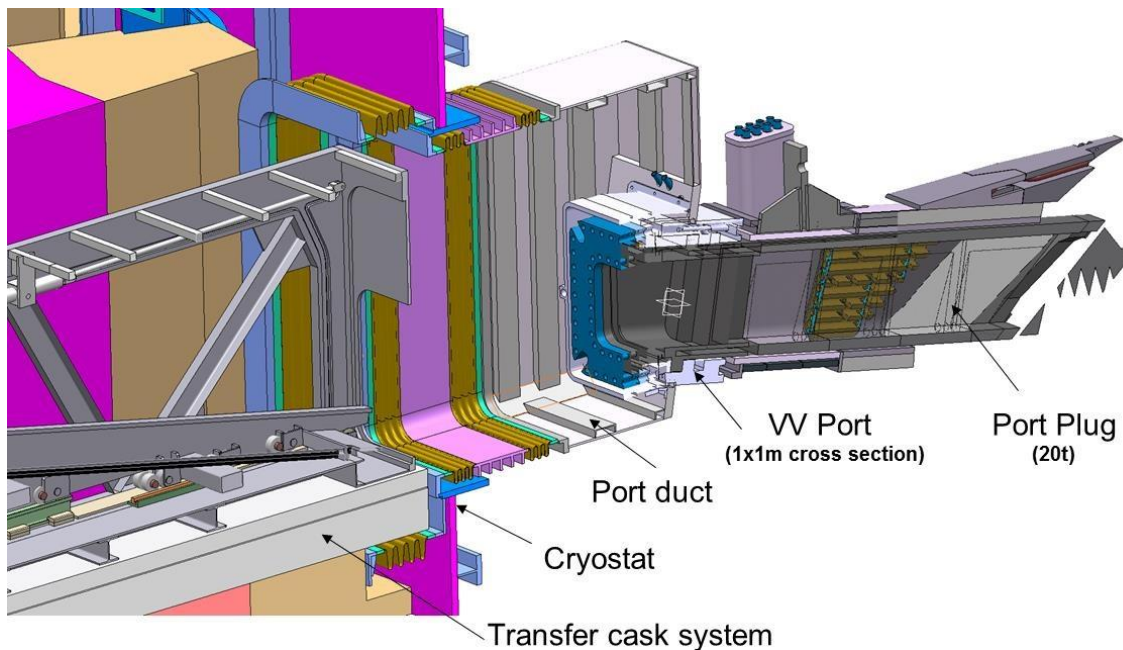


Abb. B1: Übersichtsdarstellung Port Plug am ITER Behälter

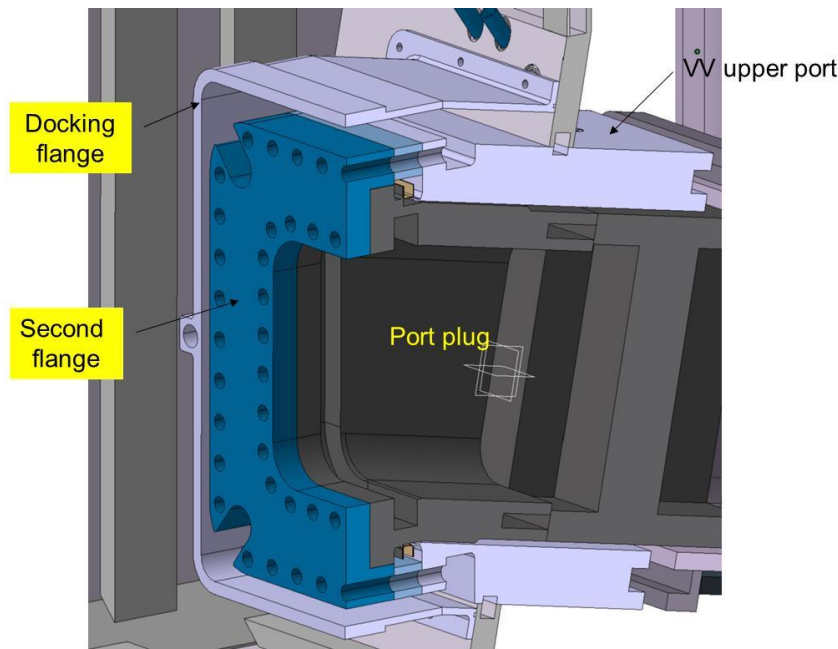


Abb. B2: Detailansicht Port Plug

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Vorarbeiten des ZAT (heute ZEA-1) zeigten, dass mit der Faserlasertechnik, die damals noch in der Markteinführung stand, eine Trenn- und Fügetechnologie verfügbar sein könnte, die die ITER-spezifischen Anforderungen ohne die unter dem Punkt „Wissenschaftlicher und technischer Stand“ erwähnten Nachteile erfüllen könnte. Durch die hohe Strahlqualität des Faserlasers wird im Vergleich zu bisherigen Systemen eine höhere Schneid- und Schweißqualität erwartet, die in optimaler Weise die sehr gute Wiederverschweißbarkeit unter Einhaltung der geforderten Toleranzfelder und Lebensdauerzyklen der Dichtung gewährleisten soll.

Vorhabensaufgabe war die Konzipierung eines lasergestützten Präzisionsschweiß- und Schneidsystems mit vollständiger Fern-Bedienbarkeit („Schweiß-Roboter“), das das Verschweißen und Abtrennen der Metaldichtung zwischen dem Flansch des Port Plugs und dem Vacuum Vessel Port erlaubt. Ein vollautomatisierter Prozess, der ein autonomes und mannloses Arbeiten im diesem strahlungsbelasteten Bereich gewährleistet. Ein entsprechendes Industrierobotersystem soll über das geplante Port Plug Zug- und Transferekaskadensystem an den Arbeitsort gefahren werden, die Dichtung zuführen und fixieren sowie Faserlaser für den Schneid- und ggf. Schweißprozess steuern.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Folgende Arbeitsschritte waren vorgesehen:

- Auslegung und Beschaffung eines Faser-Lasers für das Laser-Schweißen
- Auslegung und Beschaffung eines Roboters für das Laser-Schweißen; Integration des Lasers
- Tests des Gesamtsystems
- Schweißen von Demonstratoren

Im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Untersuchung werden wärmearme Fügekonzepte als Alternative zur bekannten Vorgehensweise und ihre Potentiale beschrieben. Grundsätzliche Erkenntnisse konnten mit dem gepulsten Nd:YAG Laserstrahlschweißen in Voruntersuchungen gewonnen werden. Als cw (continuous wave) Laserstrahlquellen eignen sich Scheibenlaser oder Faserlaser. Sie bieten mit vergleichbaren Strahlqualitäten und der fasergekoppelten Laserführung die Möglichkeit, vor Ort unter beengten Platzverhältnissen als Werkzeug mit hoher Energiedichte die zuverlässige Abdichtung des Port Plug zu gewährleisten. Ergänzend wurde die Eignung eines

mechanischen Trennverfahrens zur Nahtentfernung untersucht.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zur Vorbereitung des Teilprojekts wurden Literaturstudien zum Stand der Technik zur Abdichtung zwischen dem Port Plug und dem Vakuum-Gefäß mit teil- oder vollautomatisierten Systemen durchgeführt. Hierbei konnten zwei Systeme zum Schneiden und Schweißen von Metaldichtlippen ermittelt werden. Es kam die zu dieser Zeit verfügbare Nd:YAG Lasertechnik zum Einsatz, ein weiteres System auf Basis der WIG Schweißtechnik wurde am JET-Experiment beschrieben. Beide Untersuchungen zeigten Einschränkungen bezüglich mehrfacher Verschluss- und Öffnungszyklen aufgrund hoher Dichtungsmaterialverluste, aber auch erhöhten thermischen Verzug und eingeschränkte Bewegungsmöglichkeit und Zugänglichkeit zur Fügestelle auf. Eine Hauptforderung an den zu entwickelnden Lösungsansatz ist die notwendige remote-handling Fähigkeit, da nach Beginn des D-D bzw. D-T Betriebes an ITER Arbeiten am Port Plug aufgrund der ionisierenden Strahlung nur noch ferngelenkt oder automatisiert möglich sind.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte einerseits mit den beteiligten Industriefirmen, andererseits besteht seit 2008 eine enge Kooperation mit der RWTH Aachen im Rahmen des fügetechnischen Exzellenzentrums.

Darüber hinaus ist dieses Teilvorhaben eng mit Teilvorhaben a) verknüpft, so dass die gleichen Kooperationspartner beteiligt waren, im wesentlichen im Hinblick auf regelmäßigen Informationsaustausch.

II. Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Ergänzend zu den Voruntersuchungen mit dem gepulsten Nd:YAG Laser wurden Vorversuche mit einem 2,5 kW Dauerstrich (continuous wave) Faserlaser eines industriellen Kooperationspartners durchgeführt. Erwartungsgemäß konnten mit dieser Laserquelle für die Anwendung bessere Schweißergebnisse erzielt werden als mit dem zuvor verwendeten gepulsten Nd:YAG Laser. Gute Verfahrensparameter für eine mobile Anwendung mit geführter Passivfaser konnten rasch ermittelt werden.

Die Versuchsteile wurden pneumatisch einseitig eingespannt und bedarfsabhängig zusätzlich noch mit Spannhilfen fixiert. Untersucht wurde der nicht durchgeschweißte Überlappstoß, der erfahrungsgemäß problematische Ausgasungsverhältnisse erzeugt. Dies konnte auch im Folgenden festgestellt werden.

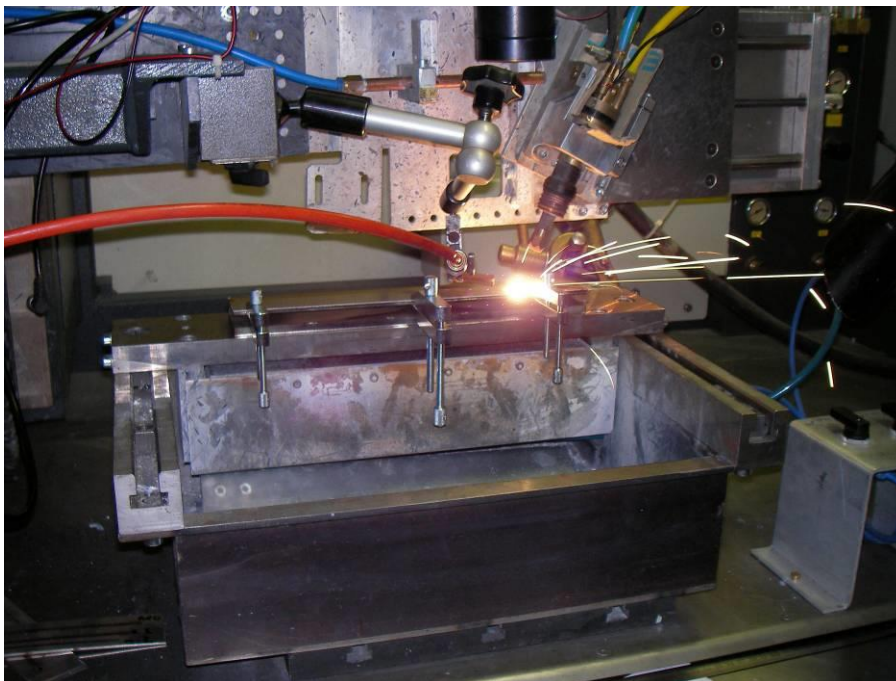
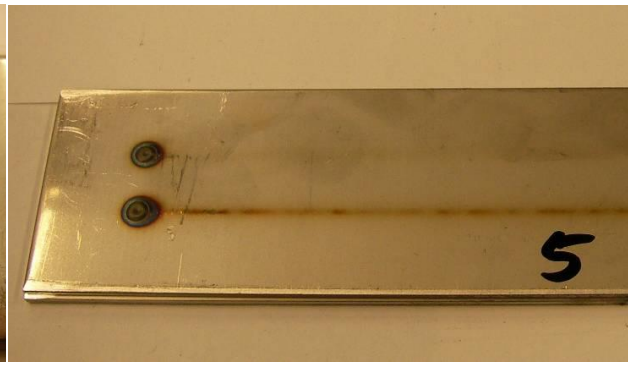


Abb. B3: Schweißung mit Parallelzwingen zur Spaltreduzierung am Bauteil

Eine ausreichende Verbindung kann bei zwei aufeinander liegenden 2 mm dicken Blechen erwartet werden, wenn die nicht formierte Unterseite gelbbraune bis blaue Anlauffarben aufweist. Dies ist für die spätere Anwendung relevant, da voraussichtlich nur die laserzugewandte Blechoberfläche mit Schutzgas beaufschlagt werden kann. Der Werkstoff 1.4404 kann aufgrund seines Oxidationsverhaltens so eindeutige Rückschlüsse auf die Schweißverbindung liefern, ohne daß es zu einer unzulässigen Überhitzung der Rückseite kommt. Diese Annahme konnte anschließend mittels metallografischer Untersuchungen bestätigt werden. Zusätzlich wurde ein Schälversuch durchgeführt, der auf die nötige Festigkeit der Verbindung in erster Näherung schließen lässt.



Oberraupe



Anlauffarben an der Unterseite einer Probe

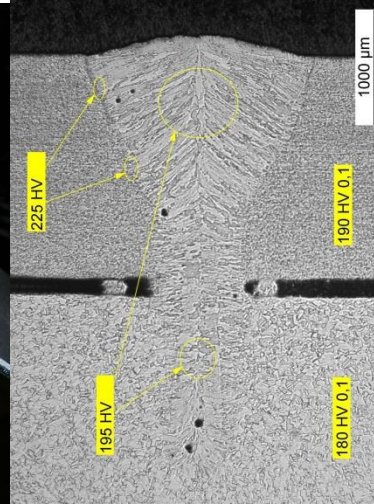


Abb. B4: Ergebnisse von Schweißversuchen

Links unten: Schälversuch im Labor

Rechts unten: Makro-Schliff einer Einschweißung; P_L : 2,5 kW, v_s : 1,8 m/min

Die gewählten Parameter zeigen im Querschliff eine ausgeprägte strahlschweißtypische Nagelkopfbildung. Die darunter liegende Schmelzzone bildet sich extrem schlank aus, wodurch die Ausgasung während der Erstarrung behindert wird. Hierdurch kommt es zu Porenbildung; bevorzugt in Richtung der dendritischen Erstarrungsfront in Schmelzonenmitte. Durch eine Variation der Fokusslage kann hierauf Einfluss genommen werden. Mit ausgewählten Schweißparametern wurden schließlich Proben für die metallografische Untersuchung und zur Ermittlung der Leckrate einer geschlossenen Verbindung hergestellt.

Die relevanten Parameter liegen bei ca. 1,8 m/min Schweißgeschwindigkeit mit einer Laserleistung von 2,5 kW. Zusätzlich wurde der Einfluss von Schutzgas und Fokusslage ermittelt.



Abb. B5: Vorder- und Rückansicht einer Schweißprobe für He-Lecktest Untersuchung
Leckrate $< 2 \cdot 10^{-9}$ mbar \cdot l/s

Ergänzend wurde schließlich noch die Einschweißung in eine massive Unterlage von 7 mm Dicke ausgeführt. Die Wärmeableitungs- und Spannungsverhältnisse entsprechen bei dieser Anordnung einem beliebig dicken Unterblech, so dass damit eine Einschweißung in den Port-Plug Kanal simuliert werden kann. Hiermit soll die Eignung des untersuchten Verfahrens

für eine alternatives Dichtungsdesign ermittelt werden. Die Schweißverbindung konnte fehlerfrei gefügt werden. Ebenso war der Querschliff unauffällig. Die Agglomeration kleiner Mikroporen in Richtung der Erstarrungsfront zu bis zu 0,2 mm großen Makroporen stellt weder eine Beeinträchtigung der Festigkeit noch eine Verschlechterung der Abdichtungseigenschaften dar. In der Spaltzone zwischen den zu verbindenden Ebenen entstehen aufgrund der günstigeren Ausgasungsverhältnisse keine signifikanten Poren. Gut zu erkennen ist im Makroschliff der Aufschweißung auf Massivblech, dass selbst bei mehreren unmittelbar nebeneinander liegenden Schweißnähten ein Verzug des Unterblechs vermieden wird. Zusätzlich kann die stabile Nahtausbildung trotz zunehmenden Abstands zwischen Ober- und Unterblech erkannt werden. Dies ist ein wichtiger Faktor für spätere „on-site“ Schweißungen, da hier beispielsweise mit parallel laufenden Rollensystemen vorgespannt werden soll und so nicht immer die absolute Spaltfreiheit gewährleistet ist. Auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse kann eine Designüberarbeitung zum Verschluss der Port Plug Öffnungen vorgeschlagen werden.

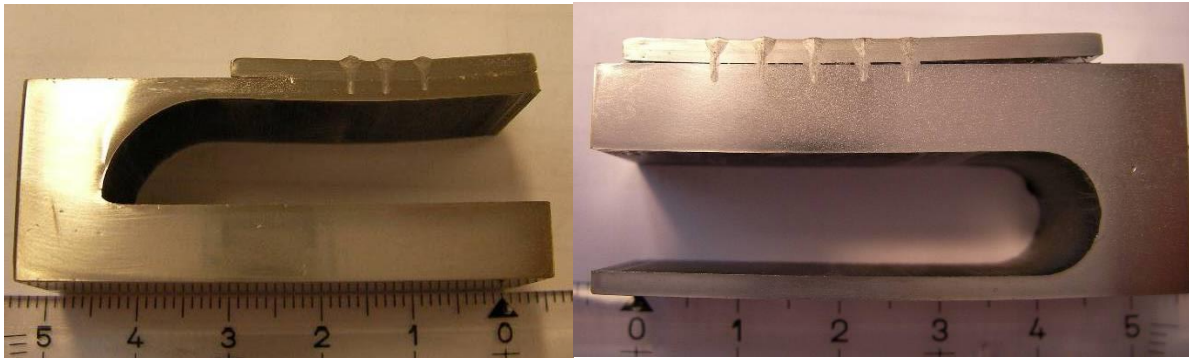


Abb. B6: Designvariation zur Dichtlippengeometrie;
Links: Designvorschlag Dickenäquivalent; rechts: „Massivwand-Aufschweißung“, Aufschweißen der 2 mm dicken „Dichtmembran“ auf 7 mm „Dickblech“

Das Laserschneiden metallischer Werkstoffe kann nur zuverlässig erfolgen, wenn die Sublimationsprodukte an der Ober- und Unterseite des zu trennenden Werkstoffs austreten können. Hierzu durchgeführte Versuche konnten nur eine unzureichende Absaugmöglichkeit der Verdampfungsprodukte des Schneidprozesses aufzeigen, so daß der Einsatz eines Fräsverfahrens zur Trennung der Schweißverbindung untersucht wurde. Alternativ zum verwendeten Laserbearbeitungskopf kommt dann ein Fräskopf mit Schaftfräser zum Einsatz. Mit diesem Fräser kann die Schweißnaht zum Öffnen des Rezipienten entfernt werden. Die Bahnkoordinaten des Schweißprozesses können hierzu übernommen werden. Damit ist sichergestellt, dass das Trennverfahren jede Kontur, die zuvor gefügt wurde auch erreichen kann. Im Labor wurden zum Nachweis Untersuchungen zur Schweißnahtentfernung durchgeführt. Die hierbei erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten hängen vor allem von der verwendeten Werkzeugführung ab und können über 1 m/min betragen. In Kombination mit dem Faserlaserschweißprozess lassen sich somit erhebliche Qualitätsvorteile und Zeitgewinne gegenüber bisherigen Anwendungsvorschlägen erzielen.

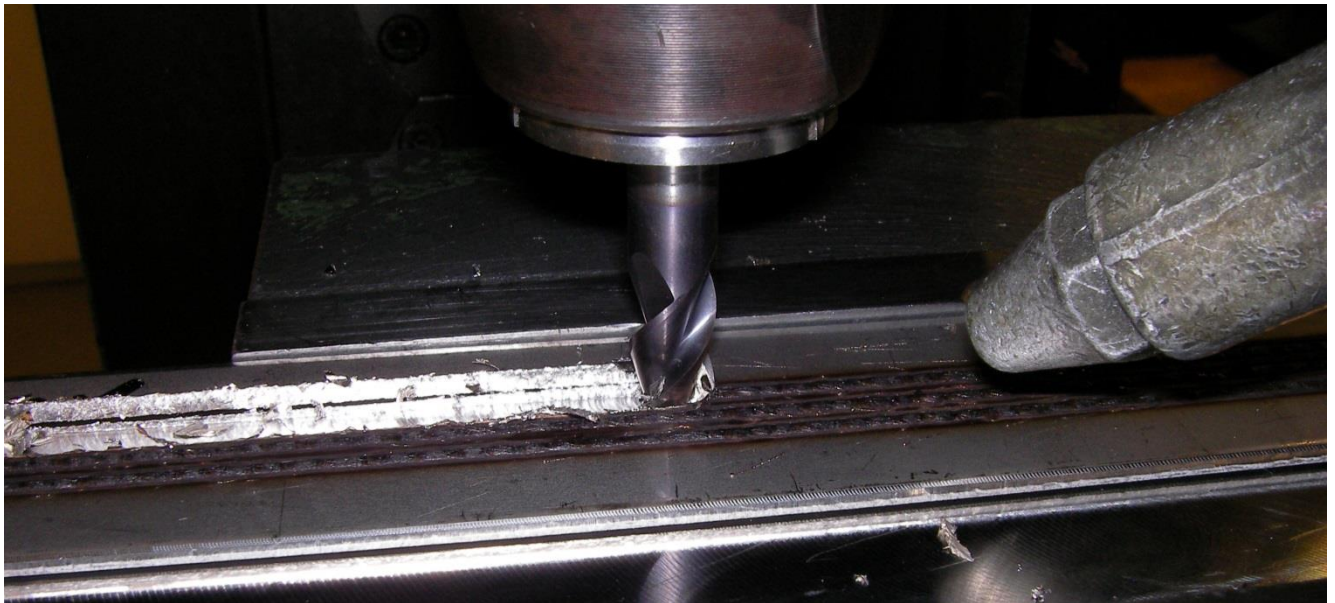


Abb. B7: Abfräsen der Schweißnaht mittels Schachtfräser

Eine schematische Darstellung der Schweiß- und Fräsvorrichtung an der Port-Plug Dichtung mit umhüllender Absaugvorrichtung für Gas-/Schweißrauch und Metallspäne ist nachfolgend prinzipiell dargestellt. Die schlanke Bauform fasergeführter Laserbearbeitungskomponenten erlaubt eine flexible Anpassung an die vorgegebene Geometrie. Außerdem kann eine Designänderung jederzeit ohne prinzipielle Neukonzeption des Füge-/Trenn-Konzepts berücksichtigt werden. Die apparative Ausstattung kann leicht mittels CNC-programmierbarer Achsen auf neue Geometrien eingerichtet werden.

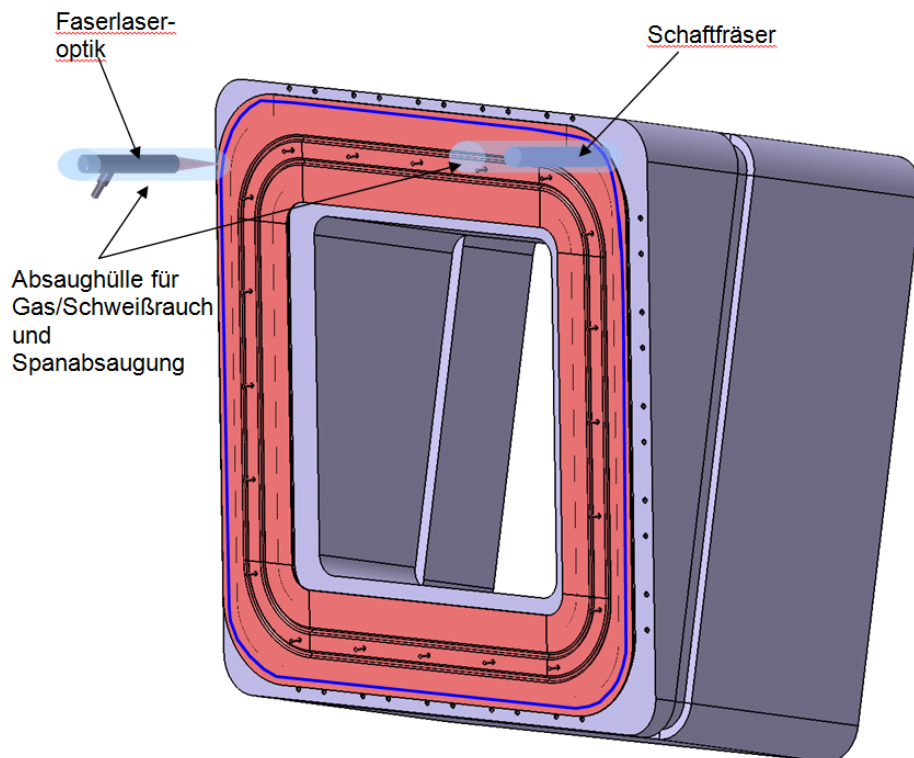


Abb. B8: Schematische Darstellung der Schweiß- und Fräsvorrichtung an der Port-Plug Dichtung mit umhüllender Absaugvorrichtung für Gas-/Schweißrauch und Metallspäne

Aufgrund der Vorversuche und zahlreicher Diskussionen sowohl mit industriellen Herstellern von fasergeführten Lasersystemen als auch mit Anwendern in der Industrie und im Bereich

des FEZ (Fügetechnisches Exzellenz-Zentrum – Kooperation mit der RWTH Aachen) wurde eine Spezifikation für die zu verwendenden Systeme, sowie ein Qualifizierungsprozedere entwickelt. Nicht alle industriellen Hersteller von fasergeführten Lasersystemen waren bereit, sich diesem Qualifizierungstest zu stellen. Im Nachfolgenden sind wesentliche Teile der Spezifikation zur Beschaffung eines fasergeführten Lasersystems aufgeführt.

1. Laser hoher Brillianz mit einem Strahlparameterprodukt (BPP) < 8 mit einer Laserleistung PL von mindestens 2 kW Dauerstrich (cw)-Leistung am Werkstück, Pilotlaser zur „teach-in Programmierung“ integriert, Beobachtungsoptik mit CCD-Kamera, Bildschirm, Fadenkreuzgenerator
2. Laser fasergeführt (robotertauglich), Lichtleiter-Faserlänge > 10 m; Lichtleitfasern in 0,2 bis 0,6 mm Durchmesser müssen verfügbar sein, Ankopplung einer zweiten Laserlichtfaser sollte möglich sein
3. 100 % Prozessstabilität bei PLmax mindestens 20 Minuten. Während des Bearbeitens auch hochreflektierender Metalle (Cu, Al) darf es nicht zu Plasmaabschirmung oder Rückreflexionen kommen, die den Schweißprozess beeinflussen können. Eine Prüfprozedur wird nach Kundendefinition durchgeführt*
4. Schweißen (Schneiden optional); Optiken hierzu mit verschiedenen Brennweiten müssen verfügbar sein
5. die Verwendung von Nd:YAG Lichtleitfasern sollte möglich sein
6. die Signaleinkopplung der Laserleistungssteuerung in ein universelles CNC-Handhabungssystem mittels Standardschnittstelle (analog) muss möglich sein

Zur Überprüfung der Prozessstabilität wird nachfolgende Prüfprozedur durchgeführt:

- a. Es wird je eine „Referenzschweißung“ mit Pmax und 10% Pmax in eine Keilprobe eingebracht. (Material und Dimension der Keilprobe wird auftraggeberseitig vorgegeben)
- b. Der Laser wird anschließend für 20 Minuten mit Pmax betrieben.
- c. Es wird eine „Vergleichsschweißung“ mit Pmax und 10% Pmax in eine Keilprobe eingebracht.
- d. Die Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse wird bewertet.

Am Ende des Auswahl- und Qualifizierungstests wurde ein System ausgewählt und beschafft, welches die Anforderungen zu 100% erfüllte.

Sowohl in der metallografischen Untersuchung als auch mittels Leckratenuntersuchung konnte die Eignung des gewählten Verfahrens als Dichtungsalternative am ITER Port Plug aufgezeigt werden. Das vorgestellte mechanische Trennverfahren zur Schweißnahtentfernung kann sicherstellen, dass stets unterhalb einer Schweißnaht die Dichtung gelöst und anschließend unmittelbar darunter wieder gefügt werden kann. Der Abstand zwischen zwei Verbindungen kann auf ca. 5 mm reduziert werden.

Zur Erstellung bauteilnaher Demonstratoren wurde in Folge die Gesamtkonzeption unter Einbindung des qualifizierten Scheibenlasers und eine geeigneten Handhabungssystems durchgeführt.

Zur Erfüllung der hohen geometrischen Anforderungen an das Handhabungssystem wurde ein Mehrachs-Linearsystem mit zusätzlicher Drehachse ausgewählt. Damit kann die erforderliche Bahntreue und Wiederholgenauigkeit bei den geforderten Verfahrenswegen eingehalten werden. Gegenüber einem Knickarmroboter passt die Rahmenbauform der Linearachsvariante in das Port Plug Tracking System, so daß eine Implementierung in die bestehenden Komponenten gewährleistet ist. Die hohe Strahlqualität des gewählten Scheibenlasers und die komplexe Fügeaufgabe am Port Plug machen ein Handhabungssystem mit der geforderten Bahntreue von $\pm 0,05$ mm erforderlich. Das gewählte Konzept ermöglicht die Fertigung eines Prototyps in Dimensionen bis 1500 x 1500 mm in vertikaler Ausdehnung. Die technische Konzeption und der Bau der Maschine zum Handhabungssystem wurde von einer der Lieferfirmen ausgeführt. Die Achssteuerung und Einbindung der Lasersteuerung sowie der integrierten Abstandssensorik wurde von einer anderen Lieferfirma übernommen. Beide beteiligten Unternehmen sind erfahrene

Systemlieferanten, die die hohen Anforderungen an das Handhabungssystem erfüllen konnten.

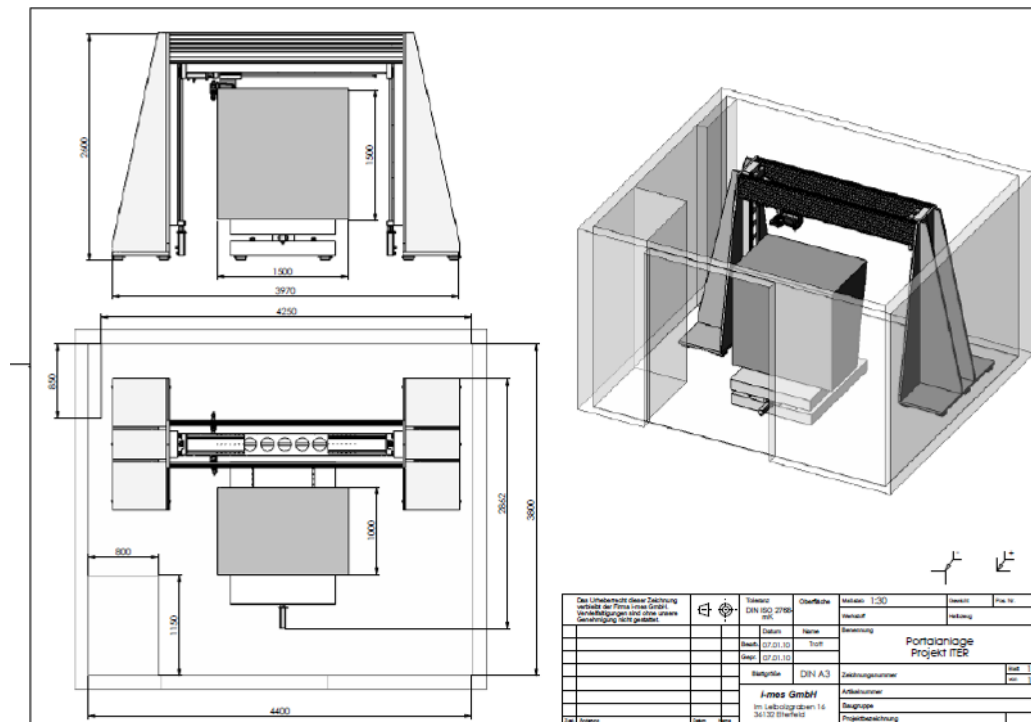


Abb. B9: Schematische Darstellung der Laser-Portalmaschine für ITER-Port-Plug Untersuchungen



Abb. B10: ITER-Laserlabor im ZEA-1; links: Steuereinheit, rechts: Laserquelle, Mitte: Portalsystem

Um einen absolut sicheren und störungsfreien Remotebetrieb in der späteren Anwendung zu gewährleisten, wurde in umfangreichen Untersuchungen die Empfindlichkeit des Lasersystems gegenüber prozessbedingten Laserstrahlreflektionen geprüft. Insbesondere bei fasergeführten Lasersystemen kann es durch ungewollte Rückreflektionen zu

Schweißprozessinstabilitäten, aber auch zur Zerstörung von Systemkomponenten wie Optik, Faser oder Laserresonator kommen. Das Lasersystem wurde deshalb einer intensiven, so bisher für Laserbearbeitungsmaschinen einmaligen Belastungsprüfung unterzogen. Zur Qualifizierung der Laserstabilität wurden zunächst Einschweißversuche an verschiedenen Versuchswerkstoffen durchgeführt. Neben Versuchsschweißungen auf Stahl- und Aluminiumwerkstoffen wurde die Wiederholbarkeit und Stabilität der Laserleistung am Wirkort (Bauteil) mit Einschweißungen in Keilproben verifiziert. Diese Keilproben ermöglichen eine unmittelbare Darstellung des Prozessverhaltens anhand von wiederholenden Einschweißungen in eine keilförmig vorbereitete Schweißprobe, die von der dünnen zur dicken Keilseite hin eingeschweißt wird. Abschließend erfolgte ein 20 minütiger Dauerbetrieb des Lasers auf einem gekühlten Kupferblock bei maximaler Laserleistung.

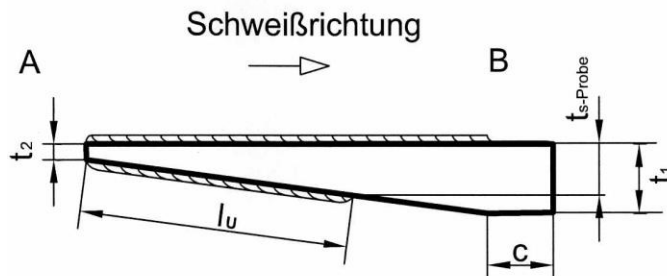


Abb. B11: Prinzipdarstellung Keilprobe



Abb. B12: Einschweißversuche ITER-Laser zur Gerätequalifizierung
Rechts: Keilprobe mit Einschweißungen zur Gerätequalifizierung

Durch eine gesteuerte Relativbewegung des Laserbearbeitungskopfes zum Bauteil wurde eine wechselnde Rückreflektion eingestellt. Die Einstrahlung erfolgte unter 90° Einstrahlwinkel. Abschließend wurde mittels Keilprobenschweißung mit Referenzparametern die Reproduzierbarkeit des Schweißergebnisses dokumentiert. Alle Prüfungen wurden fehlerfrei durchgeführt.

Bei den ersten Versuchs- und Qualifizierungsschweißungen standen zunächst die Qualitätsermittlung und Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse im Vordergrund. Neben Ein- und Durchschweißversuchen wurden untersuchungsbegleitend Keilproben angefertigt, die eine praxisnahe Reproduzierbarkeit eines Schweißergebnisses dokumentieren.

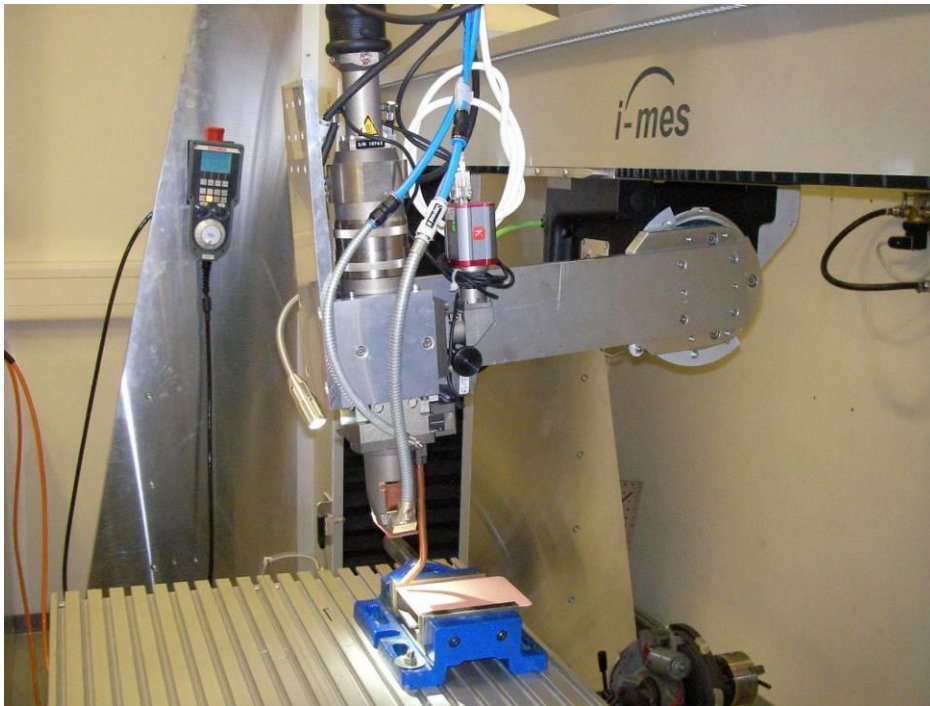


Abb. B13: Untersuchung des Rückreflexionsverhaltens auf Kupferblech

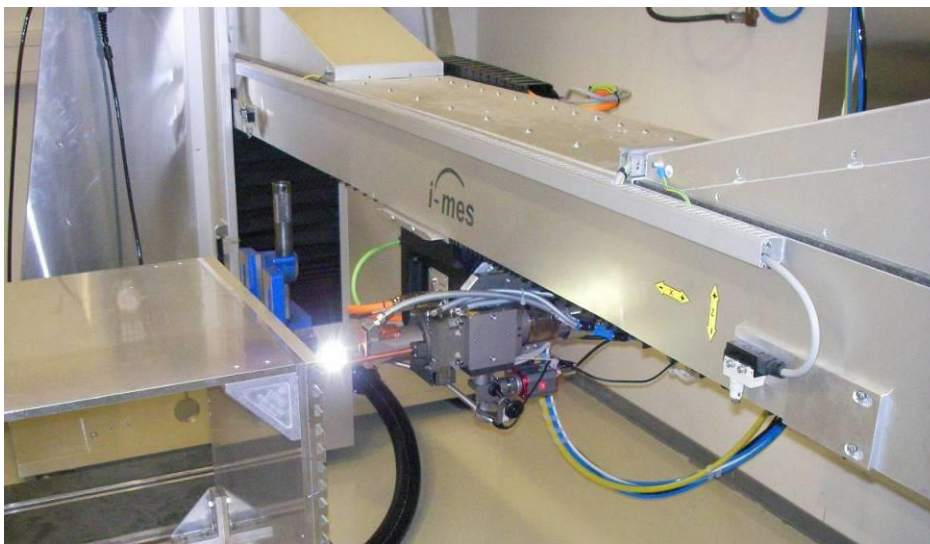
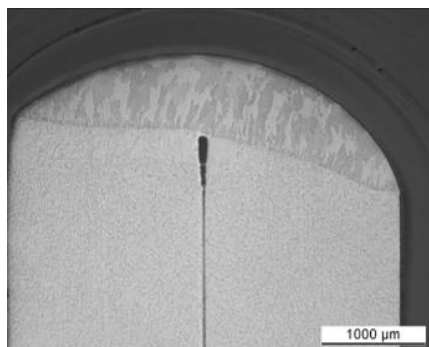
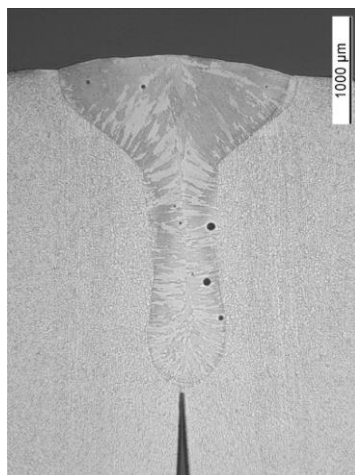


Abb. B14: Untersuchung des Prozessverhaltens bei variierender Schweißnahtorientierung (steigend/fallend/horizontal)

Umfangreiche Studien wurden zum Einfluss der Schweißnahtorientierung zunächst an Kleinproben erstellt. Hierbei konnten notwendige Randbedingungen für den korrekten Schutzgaseinsatz und die Unabhängigkeit des Prozesses vom Einstrahlwinkel ermittelt werden. Notwendig sind hierbei Schweißgeschwindigkeiten $> 1 \text{ m/min}$, um den Schwerkrafteinfluss gänzlich zu eliminieren. Vergleichsschweißungen mit dem Lichtbogenschweißverfahren (WIG/TIG) wurden erstellt, um die erheblich geringere Wärme- und damit Verzugsbelastung der Bauteile aufzuzeigen. Außerdem ist es mit dem Lichtbogen nicht in hinreichender Qualität möglich, das Durchschweißen der metallischen Dichtlippen im Überlapstoß zu gewährleisten.



WIG



Laser – steigend



Laser – fallend

Abb. B15: Vergleichsuntersuchung WIG / Scheibenlaser Schweißverbindungen



Abb. B16: Vergleichsuntersuchung zur Schweißgeschwindigkeit (1,2 m/min – 2,2 m/min)

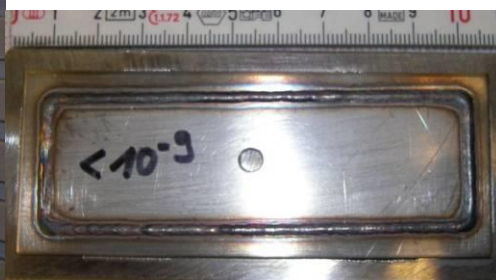
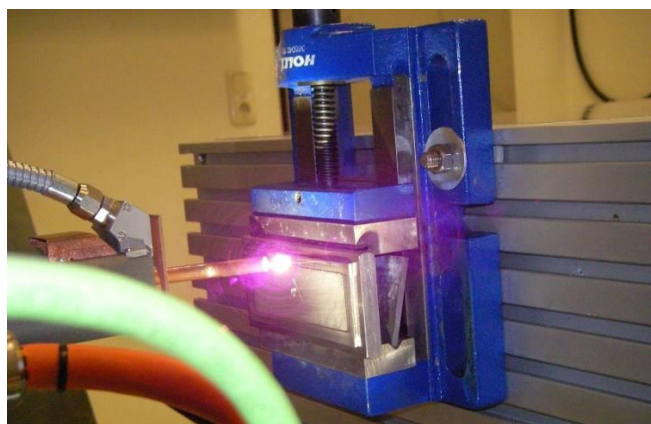


Abb. B17: Voruntersuchung zur UHV-Eignung Scheibenlaser-geschweißter Verbindungen bei Zwangslagenschweißung

Zusätzlich zum Scheibenlaser-Verbindungsschweißen und MSG-Vergleichsschweißungen wurde die Prozessvariante Scheibenlaser/MSG-Hybridschweißen untersucht, um die erhöhte Prozesssicherheit und die damit gegebene Option des Verschließens der Dichtungsgeometrie mit Schweißzusatzwerkstoff zu qualifizieren. Es konnte jedoch gegenüber der Laserstrahlvariante kein signifikanter Vorteil erarbeitet werden, so daß diese Versuche nicht weiter verfolgt wurden.

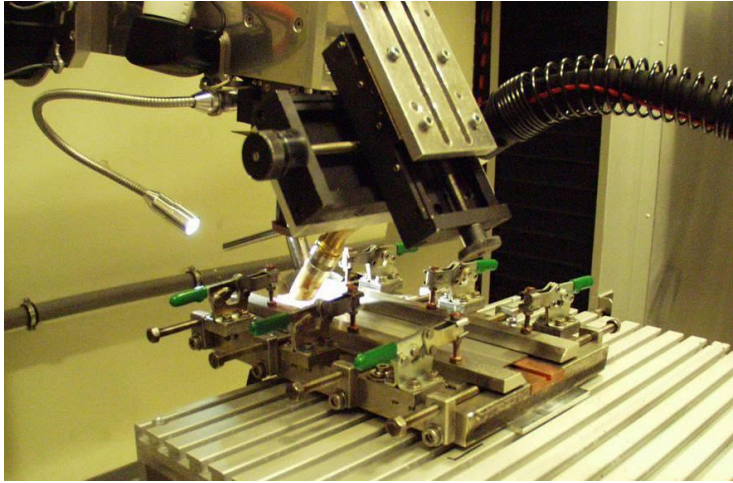


Abb. B18: Scheibenlaser / MSG-Hybridschweißen

An Demo-Teilen am Überlappstoß werden die beiden Fügepartner übereinanderliegend verschweißt. Der Einfluss der Blechdicke des Unterblechs wurde ermittelt und Prozessvariationen mit Ziel der Energie-Eintragminimierung in die Fügezone wurden durchgeführt.



Abb. B19: Prozessvariation: Scheibenlaserstrahlschweißen mit variierender Schweißposition

Die Prozessentwicklung erfolgte an Demo-Proben, die sowohl die Ermittlung makroskopisch guter Prozessparameter als auch den anschließenden He-Lecktest ermöglichten. Eine He-Leckrate $< 10^{-9}$ mbar x l/s konnte für alle ausgewählten Prozessparameter erreicht werden. Die anschließenden Untersuchungen zum Nahtpositionseinfluss zeigten z. T. jedoch erhebliche Porenbildung. Der Einfluss der Schweißnahtposition und -richtung wurde anschließend intensiv untersucht. Dabei wurden teilweise deutliche Änderungen in der Schweißnahtgeometrie festgestellt. Mittels Prozessoptimierung konnten fehlerfreie Schweißnähte an Durchschweißungen erreicht werden.



Abb. B20:

FL: -1 mm (Unterfokus) FL: 0 mm (Oberflächenfokus) FL: +1 mm (Überfokus)
 Prozessvariation: Scheibenlaserstrahlschweißen mit variierender Fokusslage und Winkelanstellung der Laseroptik bei gleichbleibender Schweißgeschwindigkeit
 Da die Dichtung am PortPlug voraussichtlich nur mittels Einschweißung ausführbar sein wird, wurde schwerpunktmäßig die Porenreduzierung der Einschweißungen untersucht. Eine

deutliche Reduzierung der Poren und auch des aufgeschmolzenen Werkstoffvolumens konnte mit angepassten Prozessparametern erzielt werden. Die gleichzeitige Minimierung der eingebrachten Streckenenergie wird sich positiv auf die zu erwartenden Schweißeigenspannungen auswirken.

Auf Basis der Einschweißergebnisse wurden erste Untersuchungen zur Gesamtkonzeptstrategie „Mehrfachverschleißbare Schweißdichtung“ durchgeführt. Zuvor eingebrachte Schweißnähte konnten ohne besondere fertigungstechnische Methoden mittels Fräsen entfernt werden. Im Folgenden wurde an Demoteilen das Werkstoffverhalten beim Öffnen und Wiederverschließen ermittelt.

Hierzu wurden großformatige Schweiß- und Öffnungsversuche angefertigt, um insbesondere das Handling unter Berücksichtigung zuvor eingebrachter Schweißeigenspannungen zu untersuchen. Das Öffnen der Schweißnähte mit dem Laserstrahl wurde aufgrund des zuvor beschriebenen Sublimationsprodukteintrags nicht weiter untersucht.

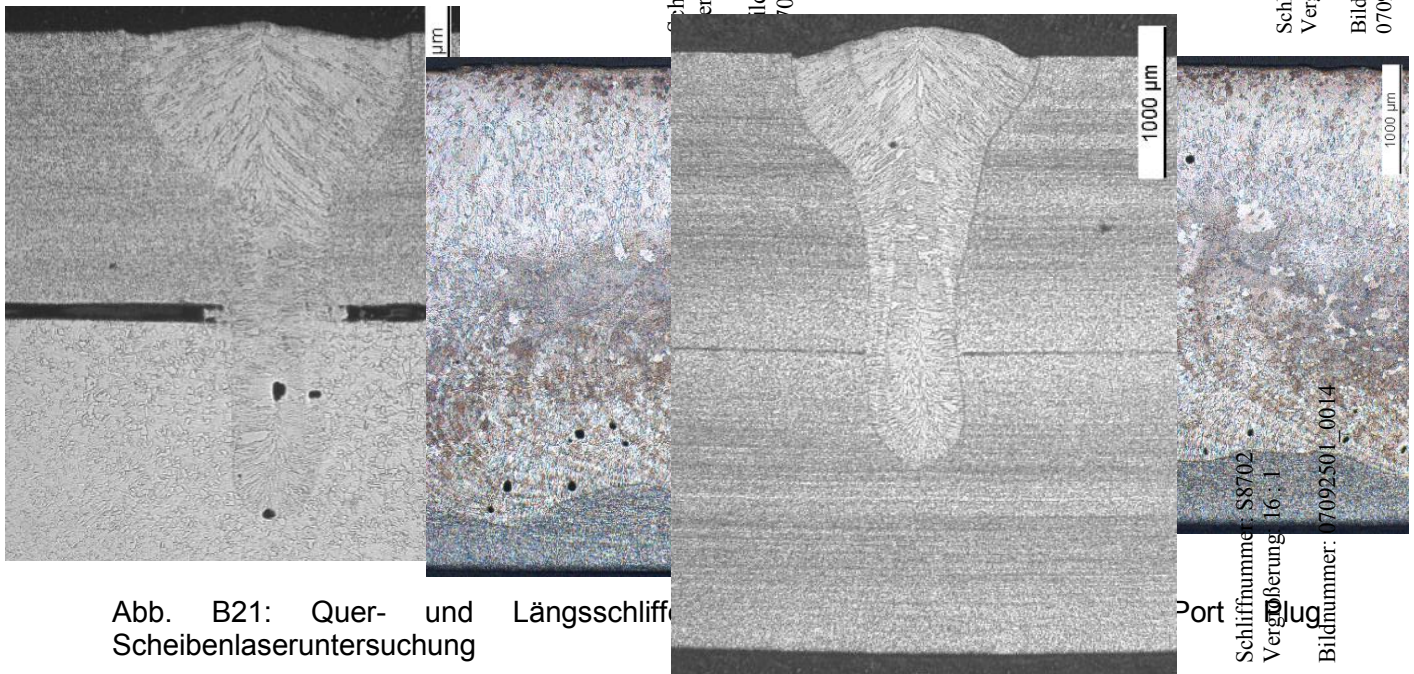


Abb. B21: Quer- und Längsschliff
Scheibenlaseruntersuchung



Abb. B22: Entfernen der Dichtnaht mittels Fräsverfahren

Für Demonstratoren in Originalgröße wurde der Werkstoff X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) verwendet, da dieser dem Originalwerkstoff am nächsten kommt und im Versuchszeitraum vorlag. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die Dichtigkeit der Bauteile. Aufgrund der Nahtlänge (> 7 m) steigt die Wahrscheinlichkeit von Undichtigkeiten im Vergleich zu kleinen Helium-Lecktestproben. Dennoch wurde mit den zuvor entwickelten Parametern eine Leckrate von $< 10^{-9}$ mbar x l/s erreicht. Die metallographische Untersuchung der Nähte an mehreren Stellen, sowohl auf geraden Strecken als auch an den Nahtradien, zeigten keine Auffälligkeiten wie z.B. übermäßige Poren oder Nahtinbrand.

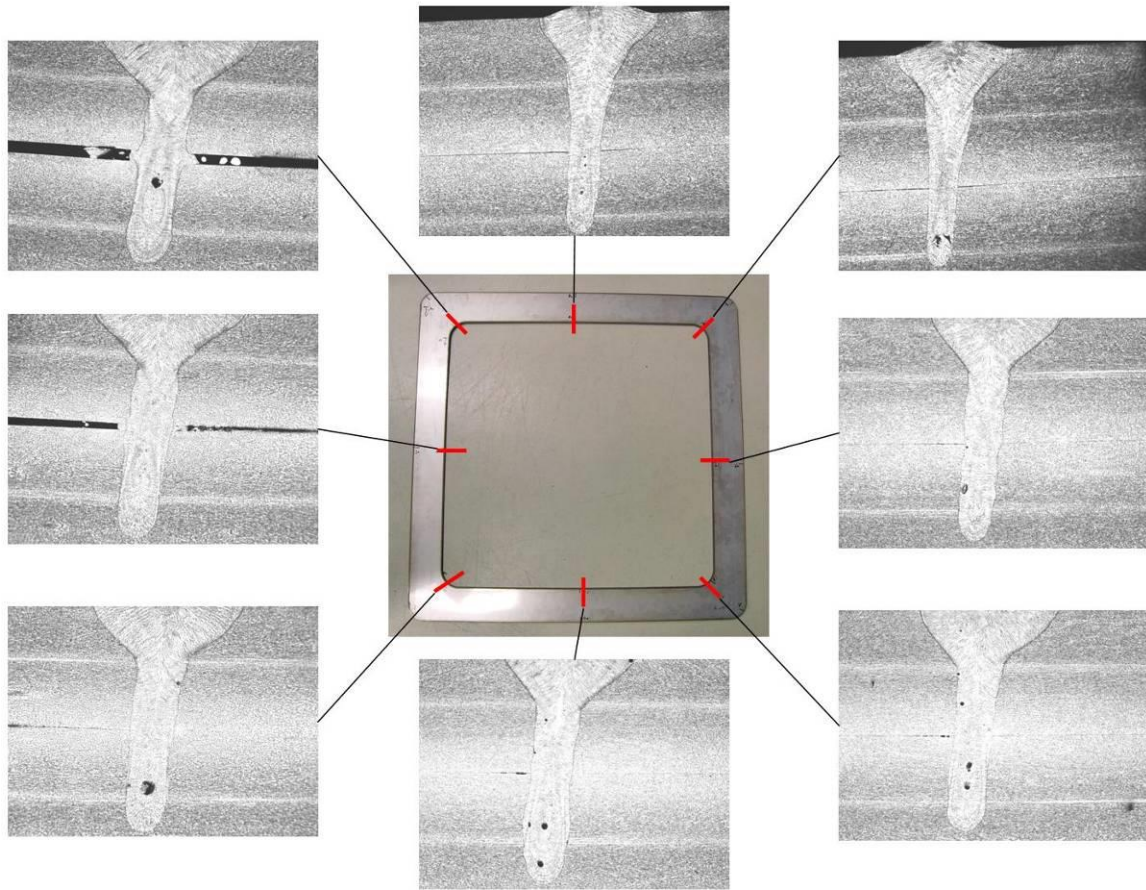


Abb. B23: Metallographische Untersuchungen an der Schweißnaht des Demonstrators

Der Abstand und die Positionierung des Laserbearbeitungskopfes am Bauteil wurde im Folgenden untersucht. Gezeigt wurde, dass selbst bei nur 30 mm Abstand der Naht von der Einspannvorrichtung keine Beeinträchtigung der Bewegungsfreiheit des Bearbeitungskopfes stattfindet und die Naht ohne Unterbrechungen erstellt werden kann.

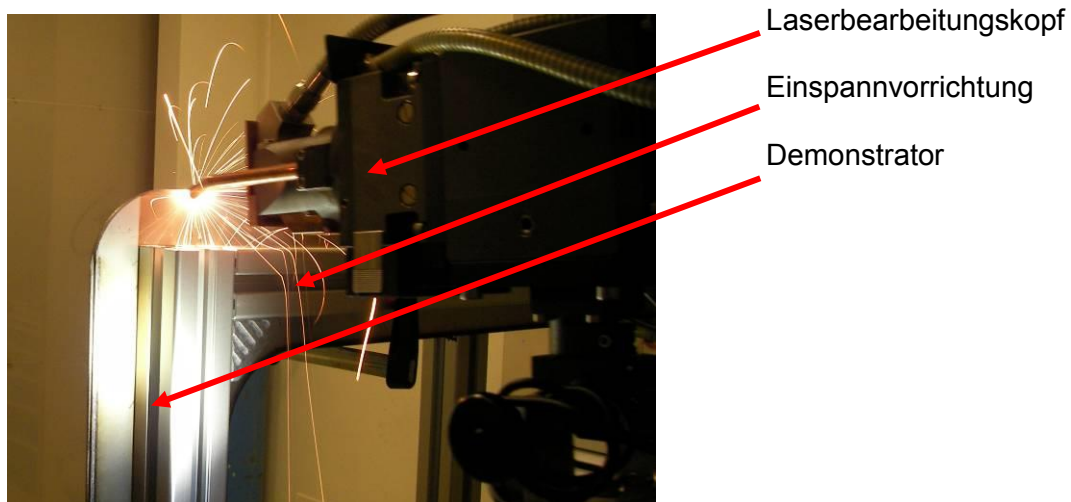


Abb. B24: Zugänglichkeit bei der Schweißnahtherstellung

Mit der Erstellung mehrerer fehlerfreier Demonstratoren im Originalmaßstab konnte nachgewiesen werden, daß das gewählte Fügeverfahren die Anforderungen an die gestellten Aufgaben vollumfänglich erfüllt.

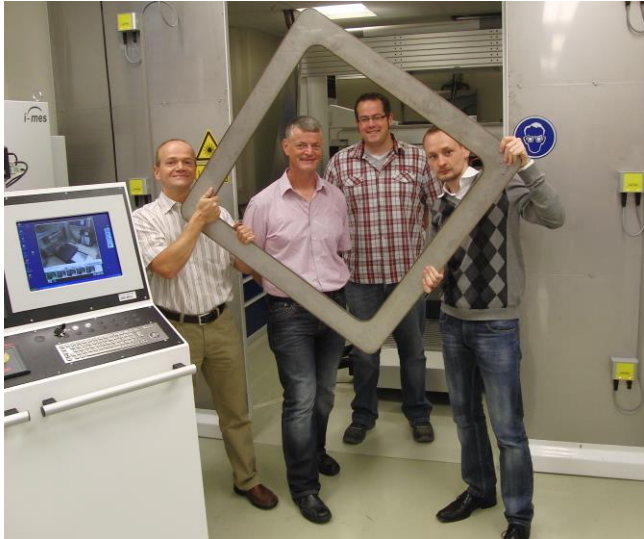


Abb. B25: Der erste mit dem Schweißroboter gefertigte Demonstrator für die Dichtnaht eines ITER Port Plugs

2. Veröffentlichung der Ergebnisse

W. Behr; D. Faidel, K. Fischer, M. Pap, G. Offermanns, *Welding feasibility study of U-shape lips at ITER Port-Plug with new laser beam sources*, Fusion Engineering and Design **88** (2013) 2096–2099

Schlussbericht (Sachbericht) zum Teilvorhaben:

Unterthema c):

“ Spiegeluntersuchungen ”

I Einleitung

Für alle optischen Diagnostiken muss an ITER das Licht in einem gefalteten Lichtweg mittels einer Spiegel-Anordnung (Periskop) vom Plasma aus zum hinteren Ende des Port Plugs geführt werden, und ein Shielding Module bzw. eine Shielding Cassette im Port Plug eingebaut werden, um somit die Neutronenabschirmung zu gewährleisten. Insbesondere der vorderste dieser Spiegel ist wegen seiner geraden Sichtlinie zum Plasma hin potentiell besonders hohen Belastungen ausgesetzt, die seine Lebensdauer an ITER begrenzen. Je nach Einbauort und Plasmabedingungen dominieren entweder die Deposition von abgetragenem Wandmaterial auf dem Spiegel oder die Erosion des Spiegels durch hochenergetische Neutralteilchen aus dem Plasma; ferner bewirken die hohen Neutronenflüsse aus der Fusionsreaktion eine nukleare Aufheizung des Spiegels sowie eine Versprödung des Spiegelmaterials. Insgesamt wird für alle optischen Diagnostiken an ITER der erste Spiegel als die kritischste Komponente angesehen, von deren Lebensdauer die Performance der Diagnostik insgesamt abhängt.

1. Aufgabenstellung

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Teilvorhabens zielten allgemein darauf ab, einerseits die genaue quantitative Vorhersage der Lebensdauer (Einsetzbarkeit für optische Diagnostiken) des ersten Spiegels zu verbessern, und andererseits Methoden zum Schutz oder zur Reinigung des ersten Spiegels zu entwickeln. Im Rahmen der Antragstellung ging es im speziellen um Untersuchungen von neutronenbestrahlten Spiegelproben, die bei SCK.CEN (Mol, Belgien) durchgeführt werden konnten, sowie um umfangreiche Studien zur Erosion und Deposition von Spiegeln an Fusionsplasmen. Ferner wurden begleitende Modellierungen durchgeführt, um die experimentellen Ergebnisse auf die ITER-Verhältnisse zu extrapolieren.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In Jülich wurde bereits seit 2003 an ersten Experimenten sowie der Modellierung der Deposition und Erosion von Spiegel-Materialien, unter anderem durch Exposition von Spiegel-Substraten durch Fusionsplasmen, gearbeitet. Weiterhin gibt es eine starke internationale Vernetzung der Spiegelforschung innerhalb der Fusion, insbesondere weil an ITER etwa 70 Spiegel von verschiedenen Diagnostiksystemen von der Problematik der Verschlechterung der Spiegeloberflächen während des Betriebs betroffen sind. Das Teilvorhaben wurde insofern in internationaler Kooperation an einer Reihe von Fusionsanlagen durchgeführt und im Rahmen der internationalen ITPA Diagnostik Gruppe inhaltlich abgestimmt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das 2007 in Jülich eingerichtete Spiegellabor sollte im Rahmen dieses Teilvorhabens um die Fähigkeit zur Untersuchung neutronenbestrahlter Spiegelmaterialien erweitert werden, damit so auch die Schädigung der optischen Spiegeleigenschaften aufgrund der ionisierenden Strahlung an ITER untersucht und vorhergesagt werden kann. Hierfür war die Beschaffung eines weiteren Spekto-Photometers mit einer fernsteuerbaren Ulbricht-Kugel für die Untersuchung von neutronenbestrahlten Spiegelproben vorgesehen, welche in einer „heißen Zelle“ durchgeführt werden muss.

Nach Einrichtung dieser neuen Messmöglichkeit sollten Untersuchungen zur Veränderung der optischen Eigenschaften von ITER-relevanten Spiegelmaterialien nach Neutronenbestrahlung durchgeführt werden.

In dem seit 2007 aufgebauten Spiegellabor in Jülich sollten weiterhin solche Spiegel untersucht werden, die zuvor dem Plasma (Laborplasmen, TEXTOR, AUG, DIII-D)

ausgesetzt waren.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der Stand der Forschung zu Diagnostik-Spiegeln für ITER zum Zeitpunkt des Projektbeginns ist in einer Veröffentlichung von A. Litnovsky et al. dargestellt²⁹. Die wichtigsten Punkte sind bereits oben in der Einleitung kurz zusammengefasst.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Ausrichtung der Arbeiten wurde international eng innerhalb der ITPA Diagnostik Gruppe abgestimmt. Die konkreten Arbeiten zur Untersuchung neutronenbestrahlter Spiegelmaterialien erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem belgischen Kernforschungszentrum SCK.CEN in Mol. Für die Exponierung von Spiegelproben an Plasmen erfolgte die Zusammenarbeit mit den Fusionsinstituten IPP Garching (AUG Tokamak), CCFE Culham, UK (JET Tokamak), General Atomics San Diego, USA (DIII-D Tokamak) sowie ASIPP Hefei, China (EAST Tokamak).

II. Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

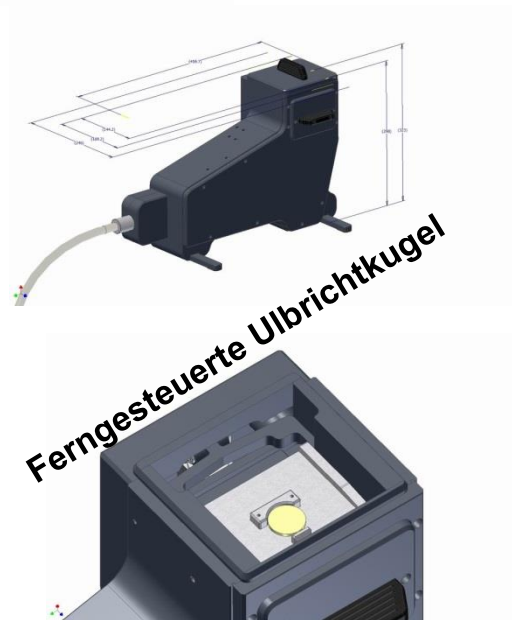
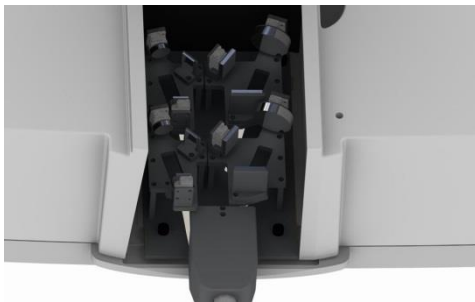
Untersuchung neutronenbestrahlter Spiegelproben

Für die Untersuchung neutronenbestrahlter Spiegelproben in einer Heißen Zelle am Kernforschungszentrum SCK.CEN in Mol (Belgien) wurde ein fernsteuerbares Mess-System entwickelt, bestehend aus einem Spektrophotometer mit ferngesteuerter Ulbricht-Kugel als kalibrierbare Lichtquelle (Abb. C1), einschließlich der zugehörigen Software und Steuerrechner. Die ferngesteuerte Ulbricht-Kugel wurde für den Roboterbetrieb in der Heißen Zelle ausgelegt und entwickelt. Alle Detektoren befinden sich außerhalb der Heißen Zelle. Sie sind mit der Ulbricht-Kugel, die in der Heißen Zelle installiert ist, über eine optische Faser verbunden. Das System wurde im FZJ in Betrieb genommen, kalibriert und im Dauerbetrieb erfolgreich getestet. Ein Mitarbeiter des Kernforschungszentrums SCK.CEN, wurde in die theoretischen Grundlagen, die praktische Bedienung des Geräts und die Software eingearbeitet.

29 A. Litnovsky et al., Nuclear Fusion **47** (2007) 833–838



Ankopplung der Ulbrichtkugel



**Probenhalter mit
Probe (gelb)**

Abb. C1. Das System für optische Messungen an neutronenbestrahlten Proben: Oben: Das Spektrophotometer; Unten links: Kopplung des Lichts in und aus der Ulbricht-Kugel; Unten rechts: die ferngesteuerte Ulbrichtkugel mit Spiegelmessvorrichtung.

Nach dem erfolgreichen Dauertest sowie Kalibration in Jülich wurden die Geräte nach Belgien versandt, dort installiert und in Betrieb genommen. In einem ersten Testexperiment wurden schwach gamma- und neutronenbestrahlte SiO₂-beschichtete Aluminium-Spiegel mit dem in Mol installierten Spektrophotometer erfolgreich vermessen. Die Spiegel mit KU1 und KS-4V Substraten wurden zunächst mit Gammastrahlung bis zu einer Dosis von 10 MGy bei 170 °C bestrahlt und anschließend mit einer Neutronenfluenz von $6.8 \cdot 10^{16} \text{ nm/cm}^2$ bei 35 °C exponiert. Die Reflektivität der exponierten Spiegel zeigte nach der schwachen Exponierung keine Abnahme. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden bei der SOFT 2012 Konferenz in Lüttich präsentiert und anschließend veröffentlicht³⁰.

Daraufhin wurden weitere Spiegelproben für eine intensivere Bestrahlung am Reaktor BR2

und Untersuchung vorbereitet. Hierfür wurden folgende ITER-relevante Materialien ausgewählt:

- Einkristall-Molybdän Spiegel [111]
- Dielektrische Spiegel mit 32 Doppellagen TiO₂/ SiO₂ Beschichtung

Zusätzlich wurden Metallproben aus Einkristall-Molybdän für die Messung der mechanischen Eigenschaften zur Bestrahlung vorbereitet. Die vorbereiteten Proben sind in Abb. C2 dargestellt.

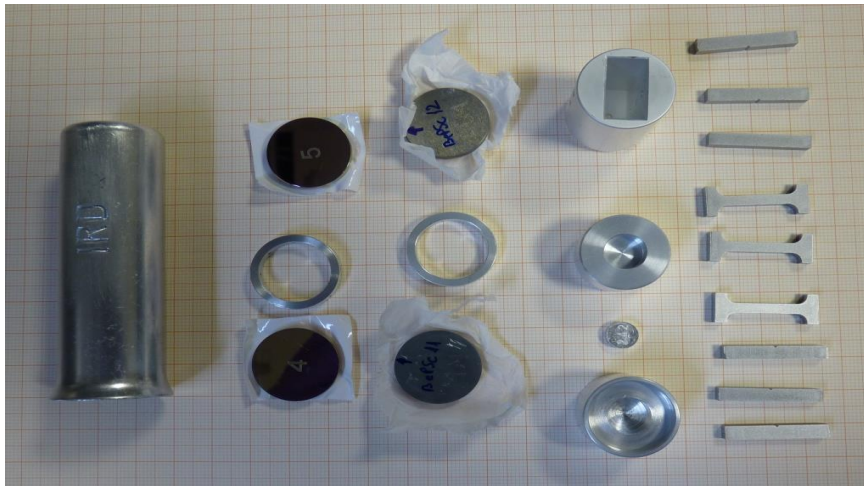


Abb. C2. Spiegel und Metallproben für die Bestrahlungskampagne im BR2 Reaktor

Vor der Exponierung an BR2 wurde die optische Reflektivität aller Spiegelproben im Spiegellabor (MirrorLab³¹) im FZJ vermessen. Die totale (R_{tot}) sowie die diffuse Reflektivität (R_{diff}) der Einkristall-Molybdän-Spiegel weisen eine perfekte Qualität sowie volle Reproduzierbarkeit der optischen Eigenschaften auf. In Abb. C3 ist die gerichtete Reflektivität als Funktion der Wellenlänge abgebildet, die für alle Spiegelproben identisch ist. Die diffuse Reflektivität beträgt < 1% (siehe Abb. C3.) und dies zeigt, dass die Spiegelproben vor der Neutronenbestrahlung eine extrem geringe Rauigkeit aufwiesen.

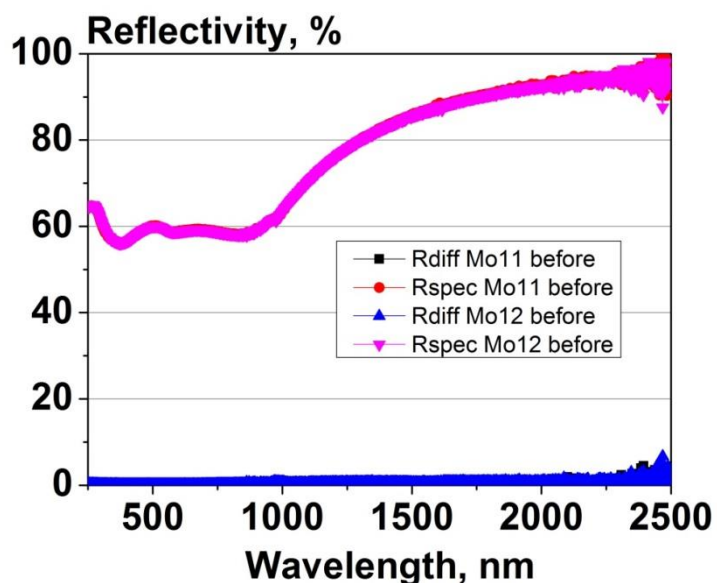


Abb. C3. Gerichtete (R_{spec}) und diffuse (R_{diff}) Reflektivität der Einkristall Mo Spiegelprobe vor der Bestrahlungskampagne im BR2 Reaktor

31 MirrorLab Website: <https://tec.ipp.kfa-juelich.de/mirrorlab/> (access details: mirrorlab@fz-juelich.de)

Für die Durchführung der Bestrahlung wurden die Proben in eine speziell angefertigte Aluminium-Kapsel eingebaut, welche mit einem Dosimeter bestückt und zur Vermeidung von Oxidation mit Helium bei 1.1 bar gefüllt war. Diese Kapsel wurde dann in einen speziellen Kanal im aktiven Bereich des BR2 Reaktors in SCK.CEN eingesetzt. Bei der Bestrahlung wurde eine Schädigung des Materials von 0.08 dpa (bezogen auf Molybdän) erreicht, abgeschätzt über das beiliegende Dosimeter. Eine rechnerische Abschätzung der Probentemperatur während der Bestrahlungszeit, die sich im Gleichgewicht zwischen nuklearer Heizung, Wärmeleitung in der Kapsel und Konvektion im Probenkanal einstellte, ergab einen Maximalwert von 239 °C.

Nach der Exponierung an BR2 wurde die Kapsel aus dem Reaktorkanal ausgebaut und nach einer Abklingzeit von Robotern geöffnet und inspiziert. Dabei wurden keine mechanischen Schäden oder Verformungen festgestellt. Die Spiegelproben wiesen ebenfalls keine sichtbaren Beschädigungen auf. Die ausgebauten Spiegel wurden in der Heißen Zelle mit dem o.a. Mess-System mit der ferngesteuerten Ulbricht-Kugel vermessen.

Die Reflektivitätskurven vor und nach der Bestrahlung sind in Abb. C4 dargestellt. Die totale Reflektivität des Einkristall Molybdänspiegels hat sich leicht verändert im Messbereich von 250 nm bis 1750 nm. Die maximale Minderung der totalen Reflektivität beträgt ca. 8%. Gleichzeitig wurde eine wesentliche Erhöhung der diffusen Reflektivität festgestellt (Abb. C5), welche nun Werte von 4% bis 10% erreicht, wobei der größte negative Effekt im ultravioletten Wellenbereich festgestellt wurde.

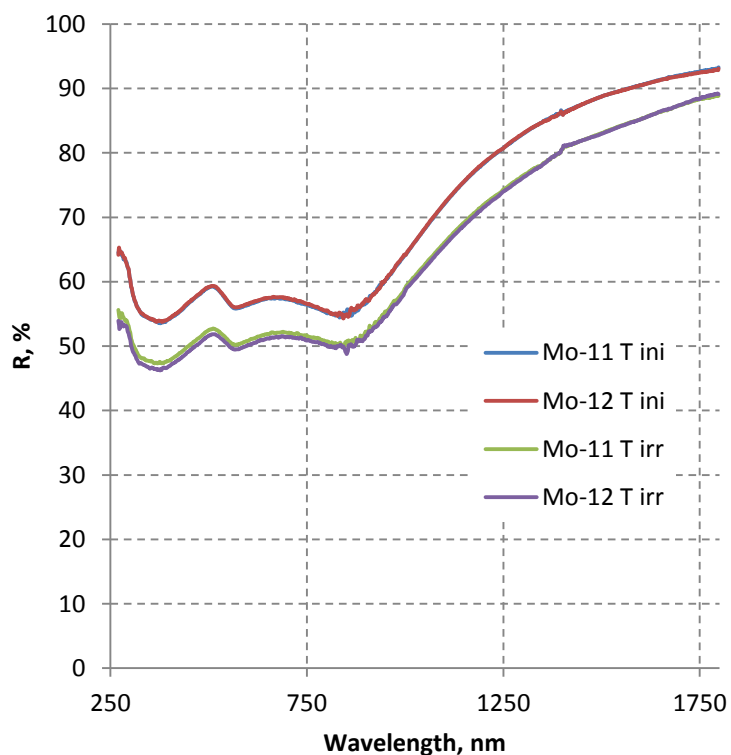


Abb. C4. Totale Reflektivität der Molybdän-Einkristallspiegel vor und nach der Bestrahlung

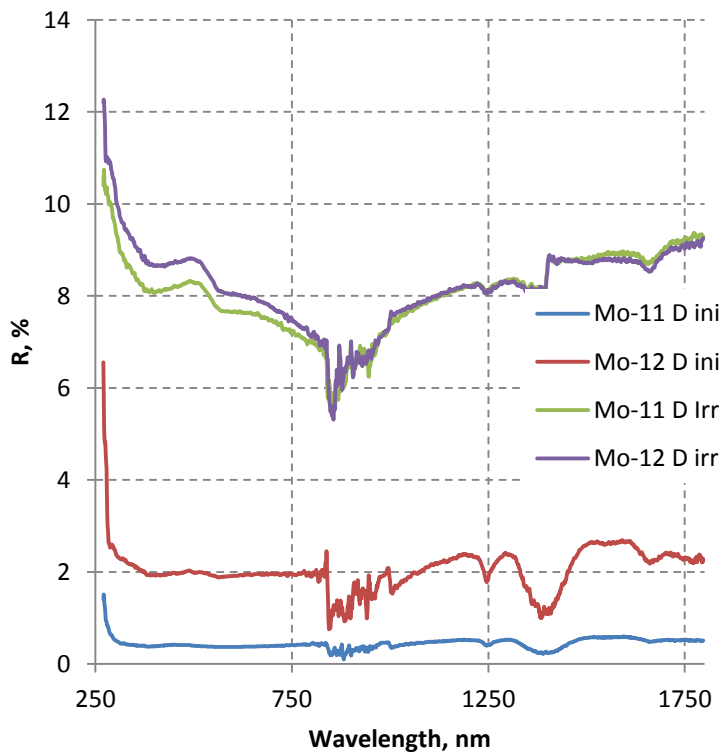


Abb. C5. Diffuse Reflektivität der Molybdän-Einkristallspiegel vor und nach der Bestrahlung

Die optischen Eigenschaften der dielektrischen Spiegel wurden durch die Bestrahlung stark verändert. Die totale Reflektivität der dielektrischen Spiegel ist insbesondere in dem Wellenbereich 300-800 nm sichtbar reduziert (Abb. C6), wobei die größte Abnahme im Bereich oberhalb von ca. 600 nm festgestellt wurde, wo die Reflektivität von ca. 100% bis auf ca. 20% abnahm. Der oszillierende Verlauf der Reflektivitätskurven ist durch den Multi-Layer-Aufbau der Spiegelschichten bedingt.

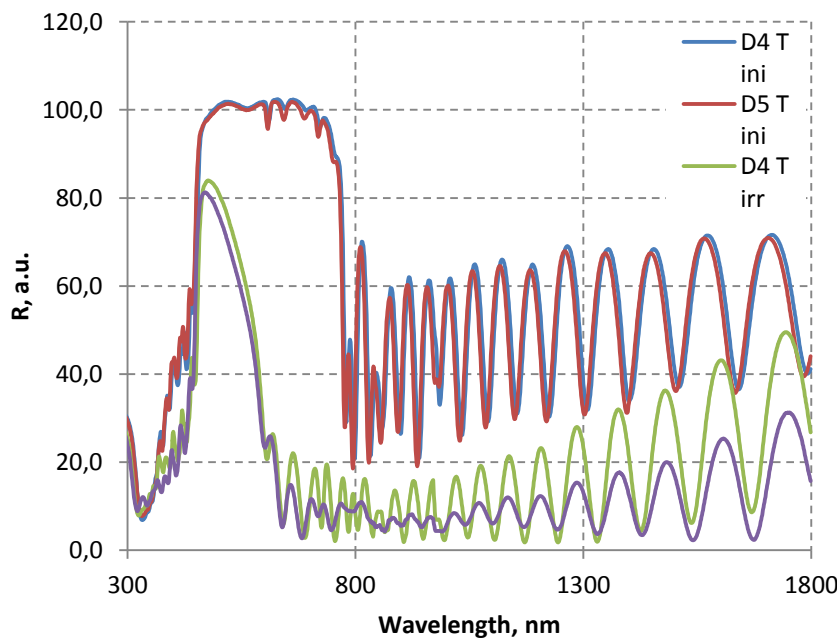


Abb. C6. Totale Reflektivität der dielektrischen Spiegel vor und nach der Bestrahlung

Die erzielten Ergebnisse werden nun weiter ausgewertet und auf die Verhältnisse an ITER extrapoliert. Durch weitere Untersuchungen muss geklärt werden, ob die festgestellte Schädigung der dielektrischen Spiegel tatsächlich durch die Neutronen- und

Gammastrahlung erfolgte, oder ob andere Prozesse dafür verantwortlich sind. In jedem Fall liegt der bei diesem Experiment festgestellte Rückgang der Reflektivität der dielektrischen Spiegel offensichtlich bereits deutlich oberhalb des für das ITER CXRS System tolerierbaren Bereichs, denn an ITER muss unter anderem die Wellenlänge der $H\alpha$ Linie (656 nm) mit guter Reflektivität abgedeckt werden. Aus den bei diesem Bestrahlungsexperiment erzielten ersten Ergebnissen lassen sich somit bereits wertvolle Hinweise für die weitere Auslegung des CXRS Diagnostiksystems für ITER ableiten. Damit wurde ein wesentliches Ziel dieses Teilvorhabens erreicht. Eine weitere quantitative Auswertung sowie Veröffentlichung der Ergebnisse wird zum Zeitpunkt dieses Berichts vorbereitet.

Spiegeluntersuchungen nach Exponierung an Plasmen

Im Jülicher Spiegellabor wurden innerhalb dieses Teilvorhabens einige notwendige Verbesserungen der Messgenauigkeit und -qualität sowie Erweiterungen der Messmöglichkeiten implementiert. So wurden neue optische Pens für das konfokale Mikroskop beschafft sowie eine neue Halterung bei einem Industriepartner entwickelt und hergestellt. Die neuen Pens erweitern den Höhenmessbereich bis max. 0.5 mm.

Für das spektroskopische Ellipsometer wurde die Software weiterentwickelt. Das neue Steuerprogramm ermöglicht Messungen von polarisiertem Licht. Beide Reflektivitätswerte für senkrecht-polarisiertes Licht R_s sowie für parallel-polarisiertes Licht R_p werden zur Verfügung gestellt. Das Ellipsometer wurde kalibriert und für neue Messungen justiert.

Für luftempfindliche Proben wie Spiegel ist die Lagerung unter Vakuum ratsam. Hierfür wurde ein neuer spezieller Schrank aufgebaut. Die Proben werden in Exsikkatoren gelagert, aktiv gepumpt durch ölfreie Membranpumpen.

Erster Test eines Einkristallmolybdänspiegels in ITER-relevanter Größe

Einkristallspiegel aus Molybdän (Sc:Mo) gelten als Hauptkandidaten für Spiegel in ITER Diagnostiken. Zurzeit gibt es jedoch technologische Beschränkungen bei der Fertigung großer Sc:Mo Spiegel. Für die Qualifizierung solcher Molybdänspiegel und deren hoher Erosionsbeständigkeit sollen Tests von industriell hergestellten Spiegeln in Plasma-Umgebung durchgeführt werden. Dazu wurde einer der weltgrößten Molybdän Einkristallspiegel in Russland hergestellt und im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Kurchatov Institut (Moskau) an das FZJ geliefert. Für entsprechende detaillierte Messungen wurde eine spezielle Messvorrichtung im FZJ entwickelt und hergestellt, womit die polarisationsabhängige Reflektivität der Spiegel mit hoher Präzision im Spiegellabor gemessen werden konnte. Der Spiegel wurde im Juni 2011 in TEXTOR Plasmen in reproduzierbaren TEXTOR Entladungen exponiert. Abbildung C7 zeigt die Ansicht der Spiegel vor (Abb. C7 a) und nach dem Experiment in TEXTOR (Abb. C7 b). Die Erosionszone auf dem oberen Teil des Spiegels wird zur Bewertung der Erosionsbeständigkeit der Spiegeleigenschaften genutzt.

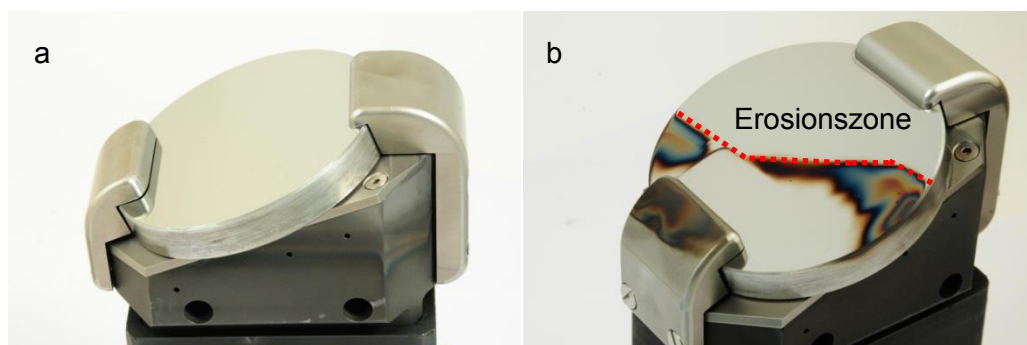


Abb. C7. Große Molybdän-Einkristallspiegel: (a) vor der Exponierung und (b) nach der Exponierung unter erosionsdominierten Bedingungen in TEXTOR.

Reflektivitätsmessungen wurden an 56 verschiedenen Stellen des Spiegels durchgeführt. Totale und diffuse Reflektivität wurden mit einem Spektrophotometer gemessen. Die Reflektivität des polarisierten Lichts wurde mittels eines spektroskopischen Ellipsometers untersucht. Die Werte der gerichteten Reflektivität an verschiedenen Stellen in der Erosionszone sind in Abb. C8 b dargestellt. Die Messstellen sind schematisch in Abb. C8 a gezeigt.

Die Ionenflüsse in radialer Richtung in TEXTOR sind inhomogen. Dies würde bedeuten, dass der obere Teil des Spiegels mit einem viel höheren Teilchenfluss exponiert wurde als der untere. Die Messergebnisse in Abb. C8b deuten jedoch eindeutig darauf hin, dass sich, mit geringfügigen Schwankungen, alle gemessenen Reflektivitätswerte auf dem gleichen hohen Niveau stabilisieren, und zwar unabhängig von der Flussinhomogenität. Diese Ergebnisse bestätigen die hohe Beständigkeit der Einkristallspiegel gegenüber der Erosion.

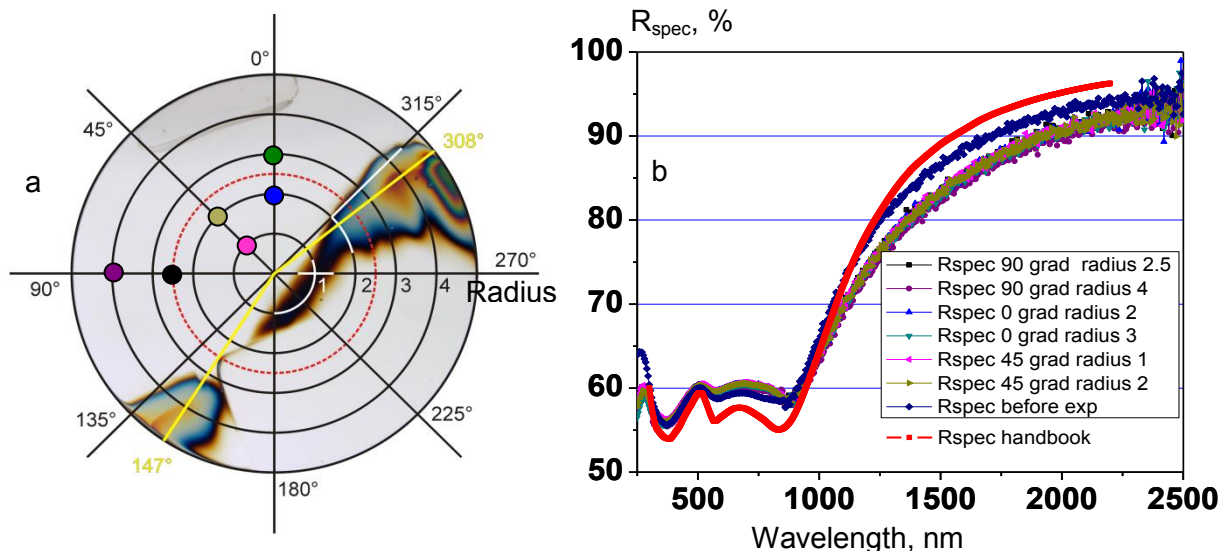


Abb. C8: Änderungen der gerichteten Reflektivität nach Exponierung im TEXTOR Tokamak: a) Das Schema der Messstellen; b) Abhängigkeit der gerichteten Reflektivität von der Wellenlänge (Messungen aus der Erosionszone).

Deponierungsminderung in diagnostischen Rohren mit spezieller Geometrie: multi-machine Experimente

Neueste Ergebnisse von Modellrechnungen zeigen die wichtige Rolle der Geometrie von diagnostischen Rohren auf die Verunreinigungsdeposition. Durch den Einbau spezieller Aperturen wird der Verunreinigungstransport im Rohr stark behindert, wobei der Einfluss von Aperturen auf die Verunreinigungsflüsse in langen Rohren besonders stark ist: Wie von der Modellierung vorhersagt³², ist der Minderungsfaktor $>10^3$ für ein Rohr mit $L/D > 30$, wobei L die Distanz zum Spiegel und D der Durchmesser des Spiegels sind. Die vorhersagten Werte haben entscheidenden Einfluss auf die Konstruktion mehrerer ITER Diagnostiken und die Lebensdauer entsprechender Spiegel. Zur experimentellen Prüfung der Modellvorhersagen wurden diagnostische Rohre verschiedener Länge und unterschiedlicher Geometrie gebaut. Einige Rohre sind mit Sperrvorrichtungen (shutter) ausgestattet, um den negativen Einfluss der Wandkonditionierung zu minimieren. Für die Geometrie der Rohre wurden verschiedene Typen von zylindrischen Rohren mit und ohne Baffles, sowie konische Rohre ausgewählt, um einen einfachen Vergleich mit der Modellierung zu ermöglichen. Alle Rohre sind mit identischen Molybdänspiegeln ausgestattet. Die gefertigten Rohrspiegelsysteme wurden im Rahmen der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern in verschiedenen Tokamaks exponiert. Als Beispiel sind die für DIII-D, AUG und TEXTOR entwickelten Systeme in Abb. C9 dargestellt. Weitere Einzelheiten wurden veröffentlicht³³.

32 V. Kotov et al., Phys. Scr. **T145** (2011) 014071

33 A. Litovsky et al., Fusion Engineering and Design 2015 (in press)

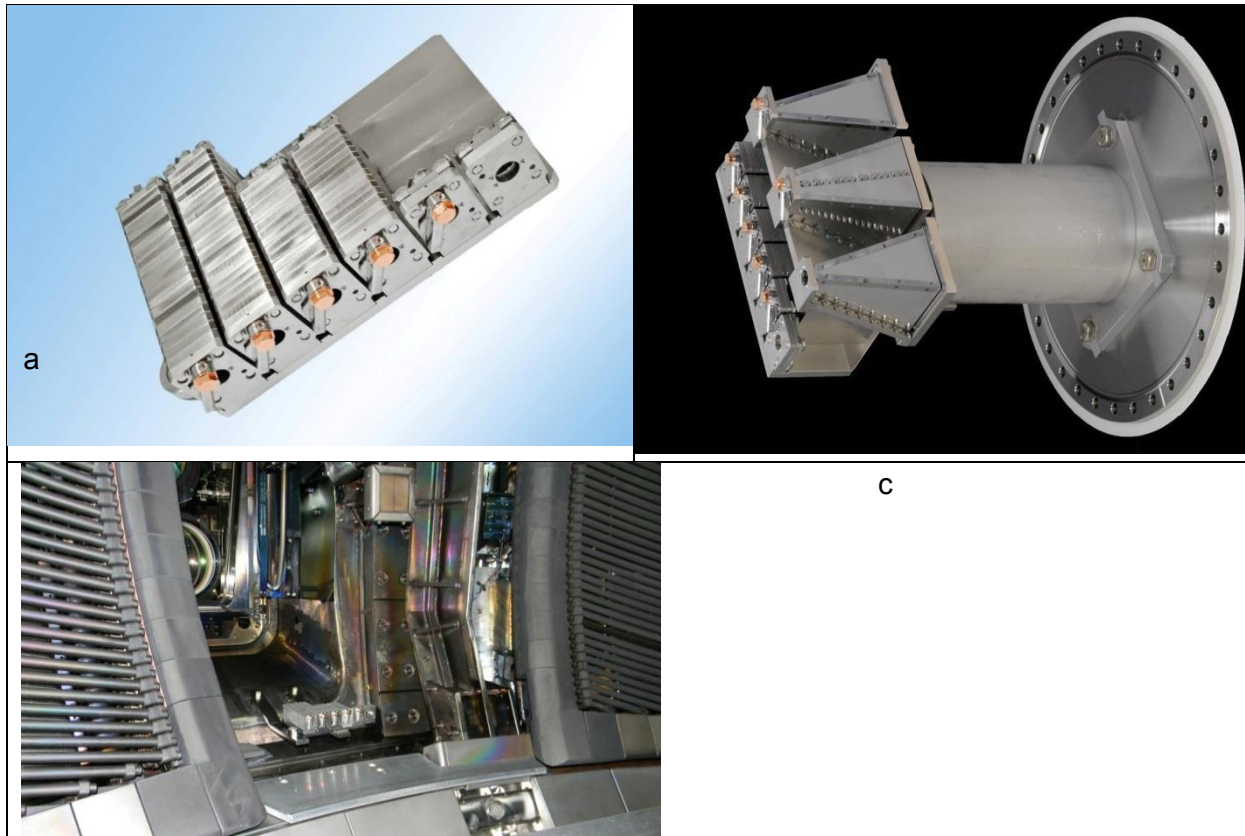


Abb. C9. Rohrspiegelsystem Mirror Station a) für DIII-D b) für den TEXTOR Tokamak und c) in mittleren Port von ASDEX Upgrade Tokamak

Spiegeltests am TEXTOR Tokamak

Alle Spiegel der Spiegelstation an TEXTOR nach Exponierung und Ausbau sind in Abb. C10 gezeigt. Laut visueller Beobachtung weisen alle Spiegel in den zylindrischen Röhren ein Deponierungsmuster auf.

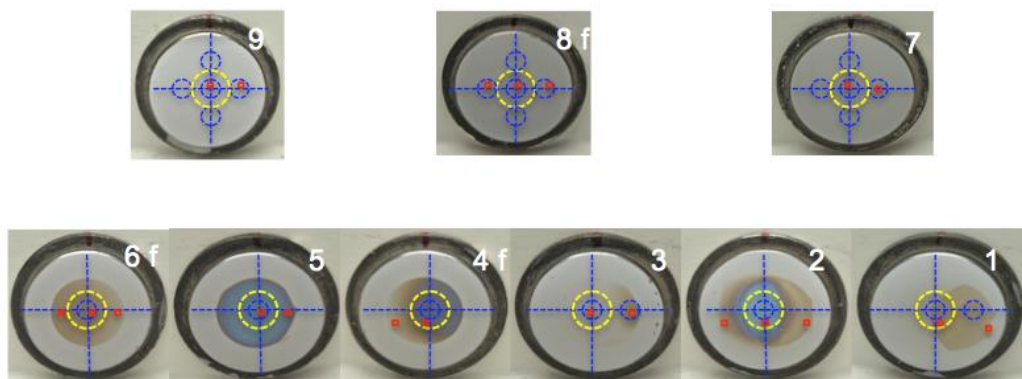


Abb. C10: Die Spiegel nach der Exponierung in TEXTOR und Messpositionen für totale Reflektivität (blaue Kreise), diffuse Reflektivität (gelbe Kreise), ESMA Linienprofile (blaue Linien). Spiegel 1 bis 6 wurden in zylindrischen Röhren exponiert, während Spiegel 7-9 in konischen Röhren exponiert wurden. Zusatz "f" bedeutet Geometrie mit Aperturen.

Die totale sowie diffuse Reflektivität wurden mittels des Spektrophotometers im Spiegellabor untersucht. Messungen der totalen Reflektivität R_{tot} wurden auf den rechten, linken, oberen und unteren Bereichen der Spiegel sowie in der Mitte der Spiegelproben durchgeführt (Abb. C10). Typische Werte der diffusen Reflektivität R_{diff} liegen bei ca. 1-3 %. Für Messungen einer so kleinen Intensität des reflektierten Lichts wird eine größere Teilfläche des Spiegels

benötigt. Deshalb konnten diese Messungen nur in der Spiegelmitte durchgeführt werden. Die benötigte für Diagnostiken gerichtete Reflektivität ist die Differenz zwischen R_{tot} und R_{diff} :
 $R_{\text{spec}} = R_{\text{tot}} - R_{\text{diff}}$.

Die Hauptergebnisse der optischen Messungen sind in Abb.C11a+b gezeigt. Es zeigte sich eine sehr geringe Zunahme der diffusen Reflektivität um $\Delta R_{\text{diff}} \sim 1 \%$ im Bereich von 250 nm - 2000 nm. Dies bedeutet, dass die Exponierung offenbar unter depositions-dominierten Bedingungen bei vernachlässigbar geringer Zerstäubung erfolgte. Abbildung C11c zeigt die totale Reflektivität der Spiegelproben vor der Exponierung. Identische Reflektivitätskurven weisen auf die hohe Qualität und Reproduzierbarkeit der Oberflächen der verwendeten Spiegelproben aus einkristallinem Molybdän hin. Nach der Exponierung war die totale Reflektivität der oberen Spiegel 7, 8 und 9 in den konischen Rohren praktisch unverändert zu den ursprünglichen Werten. Im Gegensatz dazu hat sich die Reflektivität von allen Spiegeln, die in den zylindrischen Rohren exponiert wurden, deutlich verschlechtert. Die maximale Änderung von fast $\Delta R \sim -60 \%$ bei 250 nm ist in Abb. C11 d zu sehen. Die o.g. Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass konische diagnostische Rohre eindeutig das effizientere geometrische Konzept im Vergleich zu zylindrischen Rohren darstellen.

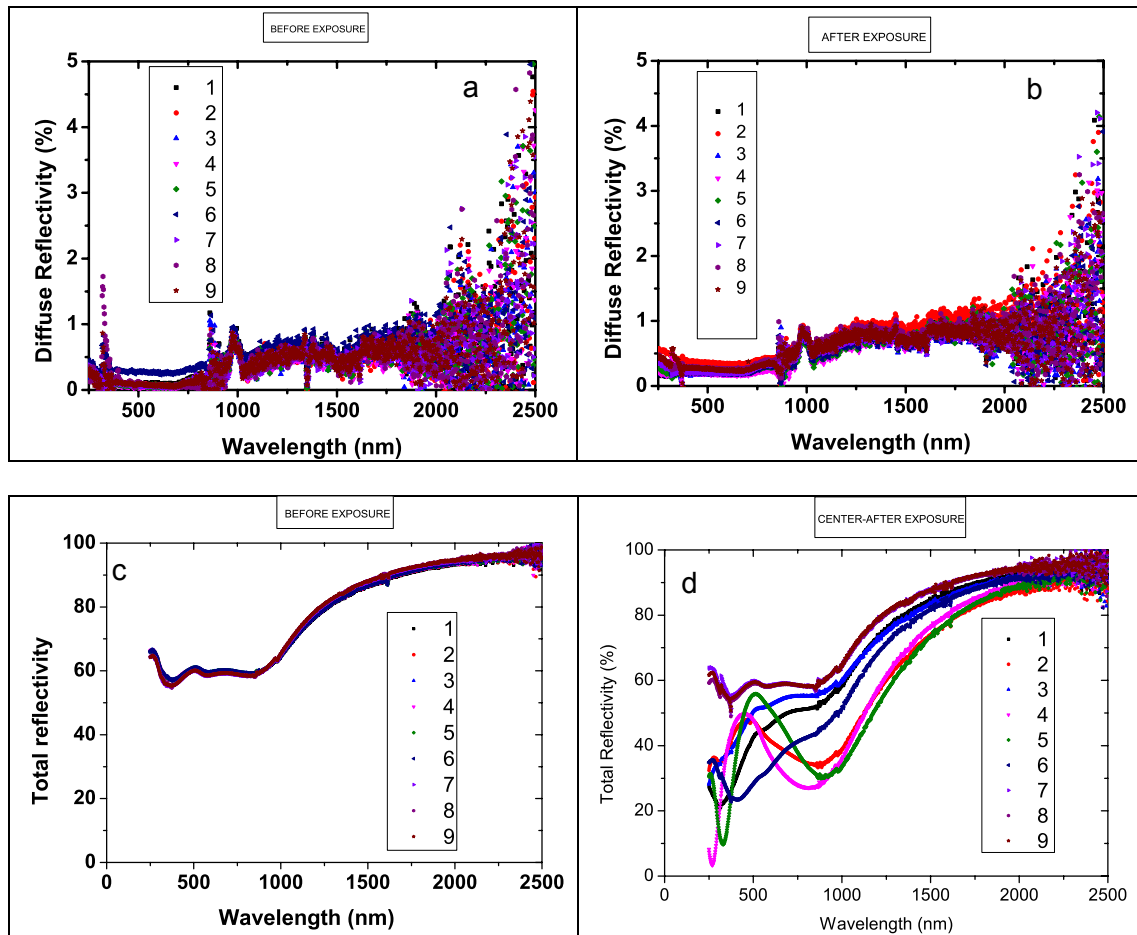


Abb. C11: Abhängigkeit der Reflektivität von Einkristallmolybdänsiegeln von der Wellenlänge für: a) diffuse Reflektivität vor der Exponierung, b) diffuse Reflektivität nach der Exponierung, c) totale Reflektivität vor der Exponierung und d) totale Reflektivität nach der Exponierung.

Um die Zusammensetzung von Verunreinigungen an der Spiegeloberfläche quantitativ zu bestimmen, wurden Elektronenstrahl-Mikroanalysen (ESMA) an den Spiegeln durchgeführt. Es wurden zwei Linienprofile pro Spiegel vermessen, von links nach rechts sowie von oben bis nach unten.

An allen Spiegeln wurden Deponierungsschichten gemessen, die hauptsächlich aus Kohlenstoff und Bor entstanden. Die von links nach rechts gemessenen horizontalen Profile von Kohlenstoffdeponierung an den Spiegeln aus den zylindrischen Rohren sind in Abb. C12 dargestellt. Große Unterschiede in der Deponierung sind aus dem Bild deutlich zu entnehmen.

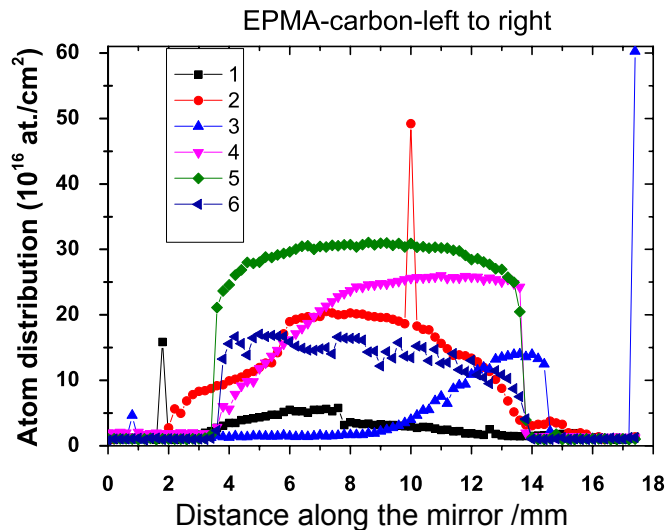


Abb. C12. Verteilung der Kohlenstoffdeponierung entlang der diagnostischen Spiegel in den zylindrischen Rohren.

Weitere Einzelheiten zu den Analysen und Ergebnissen wurden veröffentlicht³⁴.

Erster Spiegeltest in einem vollmetallischen Tokamak

Das erste Spiegelexperiment in einem Tokamak mit vollmetallischer erster Wand ist in ASDEX Upgrade (IPP Garching) durchgeführt worden. Vier Halterungen mit Kupfer und Molybdänspiegel wurden im Divertor, an der inneren Wand und in dem sogenannten „Pump duct“ installiert. Alle Spiegel wurden im MirrorLab vorcharakterisiert. Aktiv geheizte Halterungssysteme wurden im FZJ entwickelt und hergestellt. Die aktive Temperaturregelung wurde in Betrieb genommen und die aktuellen Temperaturwerte wurden ständig kontrolliert. Die Exponierung in ASDEX Upgrade fand im Zeitraum Januar - August 2011 statt.

Nach der Exponierung wurden die Spiegel ausgebaut und Oberflächenanalysen sowie optische Messungen durchgeführt. Die gesamte und die diffuse Reflektivität wurden an fünf Stellen an jedem Spiegel gemessen. Die Oberflächenanalysen beinhalteten Messungen mit der Sekundär-Ionen-Massen-Spektrometrie (SIMS) sowie mit der Elektronen-Sonden-MikroAnalyse (EPMA) und Ionenstrahlbasierten (IBA) Methoden. Für direkte Messungen der Schichtdicke wurde ein Stylus-Profilometer (DEKTAK 6M) verwendet.

Bei der Auswertung ergab sich, dass alle Spiegel während des Experiments in ASDEX Upgrade beschichtet worden sind. Allerdings beträgt die maximale Schichtdicke nur 70 nm. Die Schichten auf den exponierten Spiegeln bestehen überwiegend aus Wolfram und Wolfram-Oxid, enthalten aber zwischen 20 At. % und 50 At.% Kohlenstoff. Die gesamte Kohlenstoffdeponierung ist mindestens eine Größenordnung geringer im Vergleich zu früheren Messungen, die vor etwa 10 Jahren an ASDEX-Upgrade mit Kohlenstoff-Divertor an identischen Spiegelorten und unter ähnlichen Plasmabedingungen durchgeführt worden waren. Der Mechanismus des Wolfram-Transports wird momentan untersucht. Generell, wurde die stärkste Deponierung an den Spiegeln im Divertor Dome festgestellt (Abb. C13 a). Die kleinste Verschmutzung an den Spiegel wurde detektiert im Pump Duct, der am weitesten vom Plasma entfernt war (Abb. C13 b). Die Ergebnisse der Reflektivitätsmessungen sind in Abb. C14 dargestellt.

³⁴ A. Litnovsky et al., Nuclear Fusion 2015 (in press)

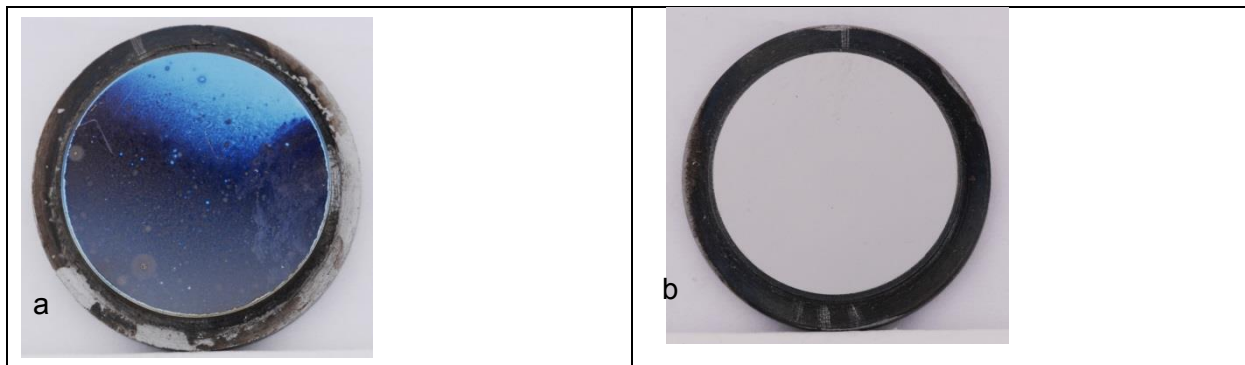


Abb. C13: Molybdän-Spiegel nach Exponierung in ASDEX-Upgrade:
a) Spiegel aus dem Dome-Bereich im Divertor und b) Spiegel aus dem Pump-duct System

Zur Auswertung der Experimente wurde die Exponierung der Spiegel an ASDEX auf ITER-Verhältnisse umgerechnet. Hierbei wurde das Verhältnis der bekannten Divertorflüsse an ASDEX zu den in ITER erwarteten Divertorflüssen berücksichtigt. Aus diesem Vergleich ergibt sich, dass die Exponierung in ASDEX Upgrade etwa 22 ITER-Entladungen entsprechen würde. Skaliert man die Ergebnisse auf geplante Plasmabetriebsdauer, so muss man in ITER pro Jahr eine Schichtdicke von etwa 1500-3000 nm unter dem Dome und etwa 200- 400 nm in plasmaabgewandten Bereichen erwarten. Dies würde eine inakzeptable Verschlechterung der Reflektivität bewirken. Dieses Ergebnis betont die Dringlichkeit der Entwicklung von Methoden zum Schutz und zur *in-situ* Reinigung von Diagnostik-Spiegeln in ITER, da ein regelmäßiger Austausch der Spiegel als nicht praktikabel erscheint. Die Ergebnisse und entsprechende Analysen wurden auf der IAEA FEC Konferenz 2012 in San Diego (USA) präsentiert und in Nuclear Fusion veröffentlicht³⁵.

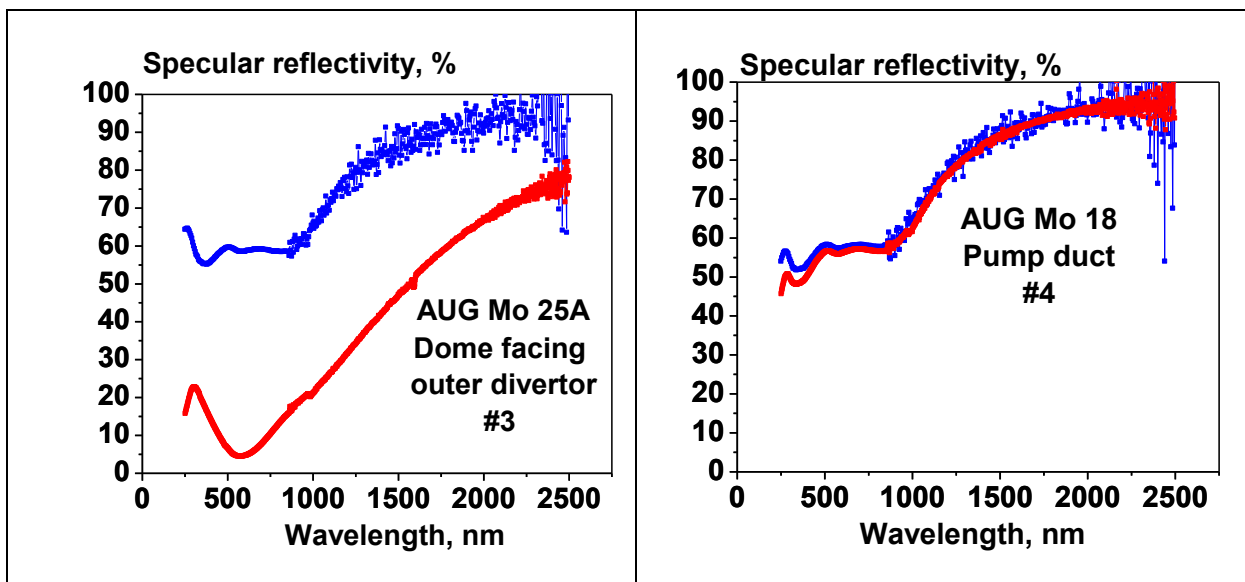


Abb. C14: Abhängigkeit der gerichteten Reflektivität von der Wellenlänge vor (blau) und nach der (rot) Spiegelexponierung: Links: Unter dem Dome im ASDEX Upgrade Divertor; rechts: Im Pump Duct von ASDEX Upgrade.

2. Veröffentlichungen der Ergebnisse

V. S. Voitsenya, A. F. Bardamid, A. I. Belyaeva, V. N. Bondarenko, G. De Temmerman, V. G. Konovalov, M. Lipa, A. Litnovsky, I. V. Ryzhkov, B. Schunke, *Interpretation of Tore Supra in-vessel mirror experiments*, Plasma Devices and Operations 03/2008; 16(1-1):1-10.

A. Litnovsky, D.L. Rudakov, G. De Temmerman, P. Wienhold, V. Philipps, U. Samm, A.G. McLean, W.P. West, C.P.C. Wong, N.H. Brooks, J.G. Watkins, W.R. Wampler, P.C. Stangeby, J.A. Boedo, R.A. Moyer, S.L. Allen, M.E. Fenstermacher, M. Groth, C.J. Lasnier, R.L. Boivin, A.W. Leonard, A. Romanyuk, T. Hirai, G. Pintsuk, U. Breuer and A. Scholl, *First tests of diagnostic mirrors in a tokamak divertor: an overview of experiments in DIII-D*, Fusion Engineering and Design, 83 (2008) 79

A. Litnovsky, V. Voitsenya, T. Sugie, G. De Temmerman, A.E. Costley, A.J.H. Donne, K.Yu.Vukolov, I. Orlovskiy, J.N. Brooks, J.P. Allain, V. Kotov, A. Semerok, P.-Y. Thro, T. Akiyama, N. Yoshida, T. Tokunaga and K. Kawahata, *Progress in research and development of mirrors for ITER diagnostics*, Nuclear Fusion 49 (2009) 075014

V. S. Voitsenya, A. Litnovsky, *Investigations of mirrors for ITER diagnostics in modern fusion devices*, Plasma Devices and Operations 12/2009; 17(4):309-318.

J. Rapp, G. J. van Rooij, A. Litnovsky, L. Marot, G. De Temmerman, J. Westerhout, E. Zoethout, *Temperature effect on hydrocarbon deposition on molybdenum mirrors under ITER-relevant long-term plasma operation*, Phys. Scr. T138 (2009) 014067

A. Litnovsky, V. Philipps, P. Wienhold, M. Matveeva, A. Pospieszczyk, G. Sergienkoa, O. Schmitz, U. Samm, H. Stoschus, C. Schulz, L. Marot, A. Romanyuk, G. De Temmerman, M. Laengner, U. Breuer, A. Stärk and TEXTOR Team, *Active control over carbon deposition on diagnostic components and in remote areas of ITER*, J. Nucl. Materials 417 (2011) 830.

M. Matveeva, A. Litnovsky, O. Marchuk, Ch. Schulz, S. Möller, P. Wienhold, V. Philipps, H. Stoschus, U. Samm and the TEXTOR team, *Active control over carbon deposition by gas feeding for the protection of diagnostic the mirrors in ITER*, Phys. Scr. T145 (2011) 014072

V. Kotov, D. Reiter, A. Litnovsky, A. Krimmer, A. Kirschner and Yu. Krasikov, *Passive protection of the ITER diagnostic mirrors*, Phys. Scr. T145 (2011) 014071

A. Litnovsky, M. Laengner, M. Matveeva, Ch. Schulz, L. Marot, V. S. Voitsenya, V. Philipps, W. Biel, U. Samm, *Development of in situ cleaning techniques for diagnostic mirrors in ITER*, Fusion Engineering and Design 10/2011; 86(9):1780-1783.

Baran Eren, Laurent Marot, Andrey Litnovsky, Maria Matveeva, Roland Steiner, Valentin Emberger, Marco Visse, Daniel Mathys, Gregory Covarel, Ernst Meyer, *Reflective metallic coatings for first mirrors on ITER*, Fusion Engineering and Design 10/2011; 86(9)

W. Biel, T. Baross, P. Bourauel, D. Dunai, M. Durkut, G. Erdei, N. Hawkes, M.v. Hellermann, A. Hogenbirk, R. Jaspers, [...], A. Panin, K. Patel, G. Pokol, M. Schrader, B. Snijders, V. Szabo, N. van der Valk, R. Voinchet, J. Wolters, S. Zoletnik, *Overview on R&D and design activities for the ITER core charge exchange spectroscopy diagnostic system*, Fusion Engineering and Design 10/2011; 86(s 6–8):548–551.

Yu. Krasikov, T. Baross, W. Biel, A. Litnovsky, N. Hawkes, G. Kiss, J. F. F. Klinkhamer, J. F. Koning, A. Krimmer, O. Neubauer, A. Panin, *Development of design options for the port plug components of the ITER core CXRS diagnostic*, Fusion Engineering and Design 10/2011; 86(9):2055-2059.

Alexandra F. Bardamid, Vladimir S. Voitsenya, James W. Davis, Vladimir G. Konovalov, Konstantin V. Kovtun, Ivan V. Ryzhkov, Anatoly F. Shtan', Sergei I. Solodovchenko, Oleg V. Trembach, Andrei A. Vasil'ev, Uwe Breuer and Andrey Litnovsky, *Comparison of the behavior of Zr(41.2%)Ti(13.8%)Cu(12.5%)Ni(10%)Be(22.5%) amorphous and crystallized mirrors under deuterium ion bombardment*, Journal of Alloys and Compounds 02/2012; 514:189–194

A. Litnovsky, M. Matveeva, D. L. Rudakov, C. P. Chrobak, S. L. Allen, A. W. Leonard, P. L. Taylor, C. P. C. Wong, B.W.N. Fitzpatrick, J.W. Davis, A.A. Haasz, P.C. Stangeby, U. Breuer, V. Philipps and S. Möller, *Impact of thermo-oxidative wall conditioning on the performance of diagnostic mirrors for ITER*, Fusion Science and Technology. 62 (2012) 971

Andrey Litnovsky, Yuri Krasikov, Vladislav Kotov, Maria Matveeva, Anatoly Panin, Liliana Vera, Luxherta Buzi, Olaf Neubauer, Wolfgang Biel, Dirk Nicolai, Philippe Mertens, Christian Linsmeier, *Mirror Station for studies of the protection of diagnostic mirrors from impurity contamination in ITER: Design and first results*, Fusion Engineering and Design 03/2015

Yury Krasikov, Anatoly Panin, Wolfgang Biel, Andreas Krimmer, Andrey Litnovsky, Philippe Mertens, Olaf Neubauer, Michael Schrader, *Major aspects of the design of a first mirror for the ITER core CXRS diagnostics*, Fus. Engin. and Design 06/2015

Schlussbericht (Sachbericht) zum Teilvorhaben:

Unterthema d):

„ CXRS Prototyp Spektrometer ”

I Einleitung

Bei den bisherigen Konzeptstudien zur ITER CXRS Diagnostik wurde erkannt, dass bei ITER im Plasmazentrum die CXRS-Intensität im Vergleich zu bisherigen Fusionsexperimenten stark abnimmt (Abschwächung des Neutralteilchenstrahls aufgrund der großen Plasmaabmessungen sowie der hohen Plasmadichten), während gleichzeitig die linienintegrierte Untergrundstrahlung erheblich zunimmt. Um diese Effekte auszugleichen und eine auswertbare Signalqualität für ITER core CXRS zu erreichen, muss die Messung an ITER mit extrem hoher Lichtstärke (Etendue, Transmission, Effizienz) erfolgen. Für die entsprechende optische Auslegung des ITER core CXRS Aufbaus konnten sowohl für die Spiegel-Anordnung als auch für das Lichtleiterbündel Lösungen gefunden werden. Für die Spektrometerauslegung wurden im Rahmen des Vorgängerprojekts 03FUS0001 Vorüberlegungen und optische Studien durchgeführt, die zeigten, dass die Anforderungen an die Grenzen des derzeit technisch Machbaren heranreichen, dass sie jedoch mit entsprechendem technischem Aufwand (komplexer optischer Aufbau; Spezialoptiken) voraussichtlich erreichbar sind.

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Antrags sollte ein Prototyp-Spektrometer mit extrem hoher Lichtstärke sowie simultaner Beobachtung von mehreren Wellenlängenbereichen bei hoher Spektrenrate entwickelt, gebaut und getestet werden, um somit die technische Machbarkeit dieser für ITER core CXRS wesentlichen Komponente nachzuweisen und damit einen entscheidenden Schritt für die Validierung des Gesamtkonzeptes zu ITER CXRS zu leisten.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Dieses Teilvorhaben ist wesentlicher Bestandteil des Projekts zur ITER CXRS Diagnostikentwicklung. Ausgangspunkt sind die im Rahmen des Vorgängerprojekts 03FUS0001 erzielten optischen Designergebnisse, auf deren Basis nun die Hardware des Spektrometers realisiert werden konnte.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Bereits in der Phase der Antragsstellung wurde mit dem damaligen niederländischen Kooperationspartner TNO nach Maßgabe der beiderseitigen finanziellen Möglichkeiten die gemeinsame Realisierung des Prototyp-Spektrometers grundsätzlich verabredet. Nach Antragsbewilligung wurde ein formeller Kooperationsvertrag hierzu geschlossen, in dem die beiderseitig zu leistenden Arbeiten bzw. Finanzierungsbeiträge, aber auch die Nutzung des Spektrometers, geregelt wurden. Anschließend wurden für die Beschaffung der Jülicher Beiträge entsprechende Angebote eingeholt und die Komponenten an TNO weitergeleitet, wo die Systemintegration stattfand. Für längere Testphasen im Labor sowie an TEXTOR wurde das fertige Prototyp-Spektrometer dann nach Jülich geliefert und später an ASDEX-Upgrade in Garching installiert. Der Test und die Nutzung des Spektrometers erfolgte jeweils gemeinsam mit den niederländischen Kollegen.

Basierend auf und begleitend zu den Messungen mit dem Prototyp-Spektrometer wurden atomphysikalische und spektroskopische wissenschaftliche Studien durchgeführt, um die Basis für die spätere Auswertung von ITER Spektren zu verbessern.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der Stand der Technik zur geplanten Entwicklung eines Prototyp-Spektrometers ergibt sich aus den Projektarbeiten im Rahmen des Vorgängerprojekts 03FUS0001, welches unmittelbar vor Antragstellung zu diesem Vorhaben abgeschlossen worden war. Dort waren in einer vergleichenden Studie insgesamt 4 grundverschiedene Ansätze für optische Konzepte für die Aufgabenstellung von verschiedenen Firmen bearbeitet worden, einschließlich von Kostenschätzungen für den Aufbau der jeweiligen Spektrometerentwürfe. Im Ergebnis war damals (Anfang 2008) der Entwurf der niederländischen Firma Dutchspace auf der Basis der Kombination von Lichtstärke, Auflösung und Preis als der deutlich beste Entwurf beurteilt worden³⁶.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die in diesem Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten erfolgten in enger Kooperation mit den niederländischen Partnern TNO, FOM-DIFFER und TU Eindhoven.

36 Abschlussbericht zum Projekt 03FUS0001

II. Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Das Hauptziel der ITER-CXRS Diagnostik ist die Bestimmung der radialen Profile der He-Asche und der Dichte von weiteren Plasmaverunreinigungen, sowie der Ionentemperatur und Plasmarotation. Um dies zu erfüllen, wird eine extrem lichtstarke Optik benötigt, weil das aus dem Zentrum des ITER Plasmas emittierte CXRS Signal aufgrund der starken Abschwächung des Diagnostik-Neutralteilchenstrahls sehr lichtschwach ist. Als wesentlicher Bestandteil der Nachweisoptik muss daher das ITER-CXRS Spektrometer über eine sehr hohe Lichtstärke bei gleichzeitig guter Wellenlängenauflösung verfügen.

Gemäß Antragstellung und basierend auf den Ergebnissen von optischen Studien innerhalb des Vorgängerprojekts 03FUS0001 wurde das CXRS Prototyp-Spektrometer in Ko-Finanzierung mit dem niederländischen Partner ITER-NL entwickelt und getestet. Hierzu wurde in 2009 ein Kooperationsvertrag zur gemeinsamen Entwicklung und Nutzung des Spektrometers zwischen FZJ und ITER-NL unterzeichnet (Ko-Finanzierung der Hardware-Komponenten durch ITER-NL und FZJ), und die wesentlichen Investitionen durchgeführt. Zum Ende des ersten Halbjahres 2010 wurde eine erste Version des Spektrometers weitgehend fertig gestellt, eine schnelle Erstjustierung durchgeführt und das Gerät für einen ersten vorläufigen Test nach Jülich geliefert. Der Aufbau des Spektrometers beinhaltet drei Wellenlängenbereiche, die simultan mit sehr hohem Lichtdurchsatz (Produkt aus Etendue und Effizienz) beobachtet werden können, um somit gleichzeitig mindestens zwei Verunreinigungsionensorten sowie die zur Kalibrierung benötigte Neutralstrahl-Emission längs derselben Sichtlinie messen zu können (Abb. D1). Die Aufgabe des Testbetriebs für dieses Spektrometer ist einerseits der technische Nachweis der praktischen Realisierbarkeit der extrem ambitionierten Spezifikationen im Hinblick auf die spätere Nutzung an ITER. Andererseits ermöglicht die simultane Messung der CXRS Signale verschiedener Verunreinigungsionen mit der Beam-Emission längs derselben Sichtlinie eine neue Qualität für Untersuchungen zur Validierung der CXRS Diagnostik für ITER.

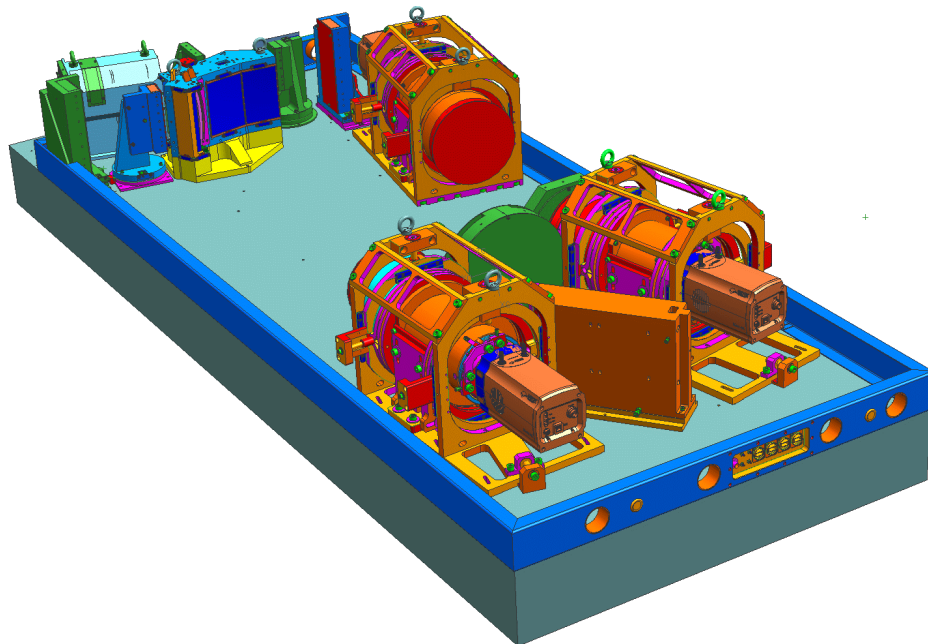


Abb. D1: Schematischer Aufbau des ITER CXRS Prototyp-Spektrometers³⁷

Die Target-Spezifikationen des Spektrometers ergeben sich aus Tabelle T3:

³⁷ N. van der Valk et al., SOFT Konferenz 2010

Wavelength band / nm	Resolution	Accessible elements	Efficiency \times Etendue
460.8 to 473.6 nm	0.2 nm	He II, Be IV	0.24 mm ² sr
518.9 to 533.1 nm	0.2 nm	C VI, Ne X Ar XVII	0.13 mm ² sr
649.0 to 663.0 nm	0.1 nm	BES (H α)	0.06 mm ² sr

Tabelle T3: Target-Spezifikationen des ITER CXRS Prototyp-Spektrometers

Zur Validierung der Spezifikationen wurde zunächst eine Kalibrierung des Spektrometers im Labor und anschließend erste Messungen von He-, C- und Ne- am Tokamak TEXTOR durchgeführt. Danach erfolgte ein längerfristiger Testbetrieb mit Messungen der Spektren von Helium am Tokamak ASDEX im Rahmen der Doktorarbeit von A. Kappatou³⁸.

Wellenlängenkalibrierung

Die Wellenlängenkalibrierung wurde durchgeführt, um die Spektralauflösung des Spektrometers (Tabelle T3) zu messen. Abbildung D2 zeigt ein Beispiel der Kalibrierung des Kanals 4 mit der Hilfe einer Ne Kalibrierungslampe. So wurde eine Spektralauflösung von 0.08 nm erreicht, die sogar die Zahlen der Tabelle T3 übertrifft. Die gute Auflösung stellt eine notwendige Voraussetzung für erfolgreiche Messungen von Ionentemperatur und Plasmarotation dar. Für die anderen Spektralkanäle wurden ähnliche Tests durchgeführt und in allen Fällen wurde am Ende die Spezifikation zur Spektralauflösung erreicht.

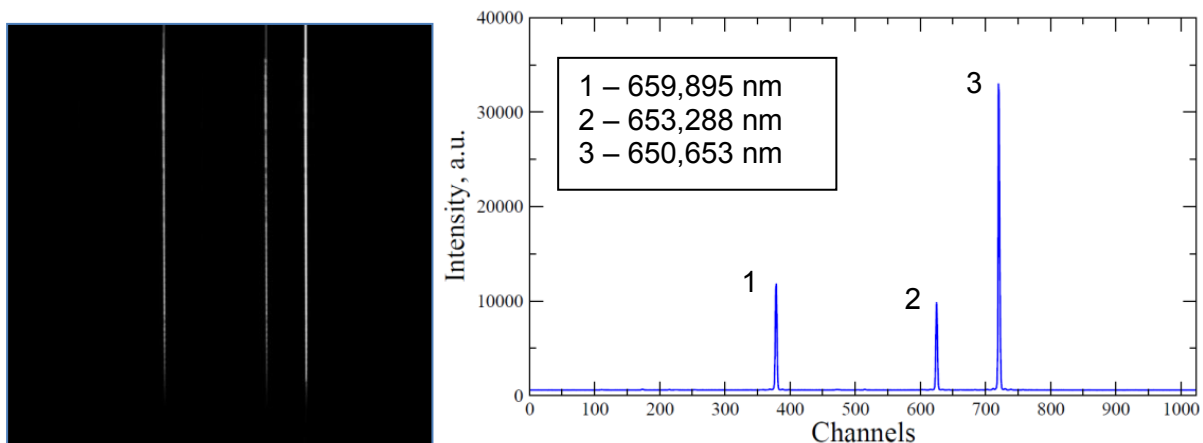


Abb. D2: Beispiel der Kalibrierung des Kanal von H α Linie mit der Neonlampe. a) Das Bild auf dem Chip der Kamera; x-Achse entspricht der Wellenlänge, y-Achse entspricht der Position im Plasma; b) Das gemessene Spektrum der Kalibrierungslampe. Aus der Halbwertslinienbreite von 3-6 Pixeln ergibt sich die Auflösung von 0.1-0.2 nm des Spektrometers. Aus dem Linienabstand lässt sich die Dispersion bestimmen (0.02 nm/pixel)

Absolutkalibrierung

Eine Absolutkalibrierung des Spektrometers ist notwendig, um die effektive Etendue des Spektrometers zu bestimmen. Da im Weiteren auch Messungen am TEXTOR-Plasma geplant waren, wurde die Absolutkalibrierung für das Gesamtsystem durchgeführt, d.h. Spektrometer einschließlich Beobachtungssystem an TEXTOR.

Hierzu wurde zunächst das optische System (Periskop) entwickelt, welches das Licht vom Tokamak zum Spektrometer über ein Lichtleiterbündel überträgt. Um Lichtverluste zu vermeiden, muss die Etendue aller optischen Elemente aufeinander abgestimmt sein. Abbildung D3 zeigt das neu entwickelte Periskop für den Tokamak TEXTOR.

38 A. Kappatou, *Investigations of helium transport in ASDEX Upgrade plasmas with charge exchange recombination spectroscopy*, PhD thesis, TU Eindhoven, 2014

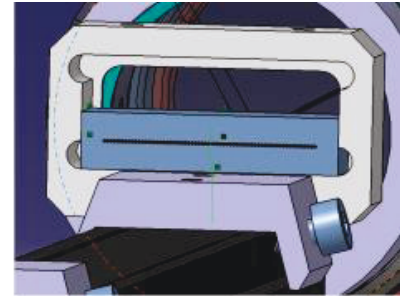
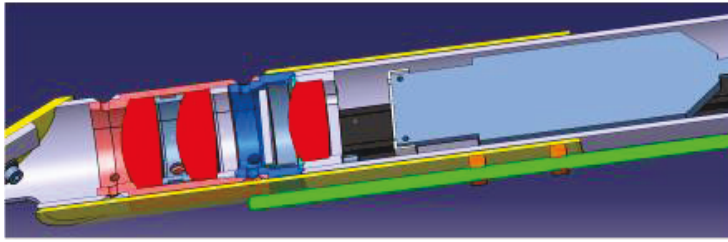


Abb. D3: CATIA-Zeichnung des Periskops: a) optisches Labyrinth bestehend aus Spiegel, drei Linsen und Vakuumfenster ; b) Halterung der Lichtleitern im Periskop.

Das Lichtleiterbündel besteht aus 68 Lichtleitern und verbindet das Periskop mit dem Spektrometer. Abbildung D4.a zeigt die Auslegung der Lichtleiter am TEXTOR, die zur Messung der Spektren und Absolutkalibrierung verwendet wurden. Es wurde der NBI-2 Neutralstrahl in der äquatorialen Ebene im Gefäß ab dem Liner bis zur Mitte beobachtet. Die radiale Auflösung variierte zwischen 3-5 cm, abhängig von der Position. Der Durchmesser jedes einzelnen Lichtleiters entspricht nach optischer Abbildung ungefähr 3-5 mm an der Messposition. Das zeigt auch die Abbildung D4.b.

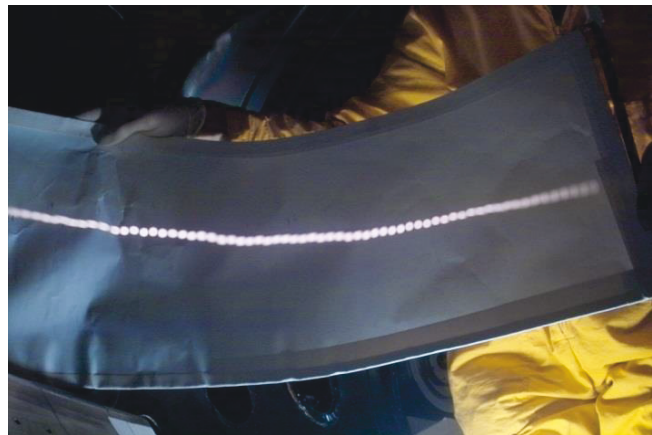
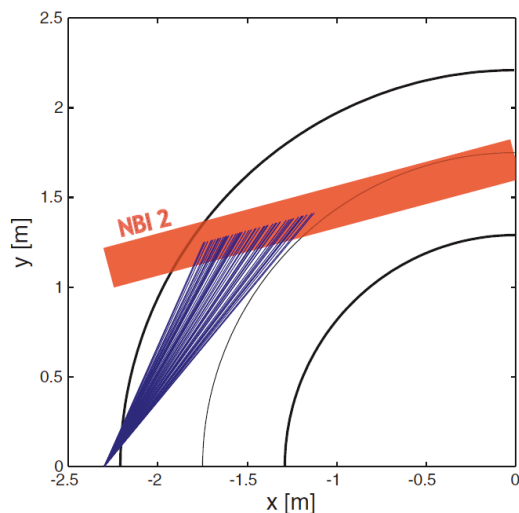


Abb. D4: a) Auslegung der Beobachtungsoptik³⁹, b) Rückleuchten vom Spektrometer in die TEXTOR Kammer.

Die Rückbeleuchtung der Lichtleiter wurde durchgeführt, um die genauen Messpositionen in der TEXTOR-Kammer festzustellen. Danach wurde die Kalibrierungslampe genau an diesen markierten Positionen im TEXTOR angebracht und befestigt, um die Messungen für die Intensitätskalibrierung durchzuführen. Die Spektraleigenschaften der benutzten Ulbrichtkugel (Kalibrierungslampe Typ US-060) sind im folgenden Bild dargestellt:

³⁹ Kappatou A. et al. Rev. Sci. Instrum. 83 10D519 (2012)

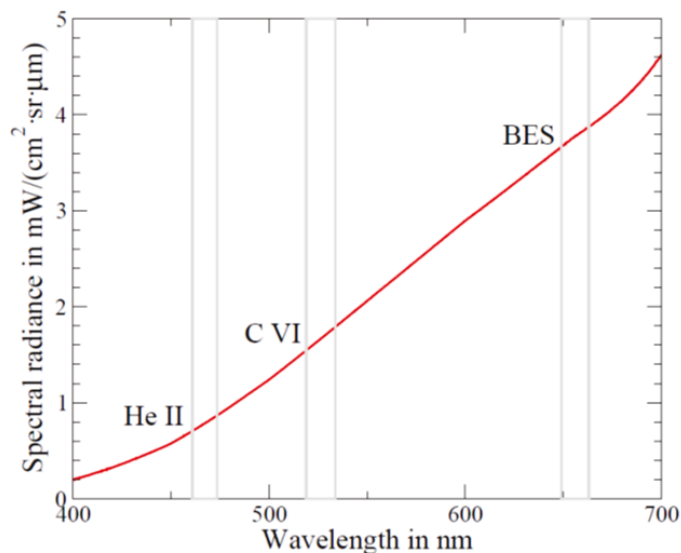


Abb. D5: Spektralstrahlendeichte der Kalibrierungsquelle (Ulbrichtkugel). Die Positionen der Spektralkanäle des Spektrometers sind im Bild angedeutet (He-Kanal, C- Kanal, BES-Kanal)

Die Öffnung der verwendeten Ulbrichtkugel beträgt 60 mm, so dass ca. 5-6 Lichtleiter gleichzeitig beleuchtet werden können. Der Intensitätsverlauf der gemessenen Kalibrierungsdaten ist in Abbildung D6 für den H α - und den C-Kanal beispielhaft dargestellt.

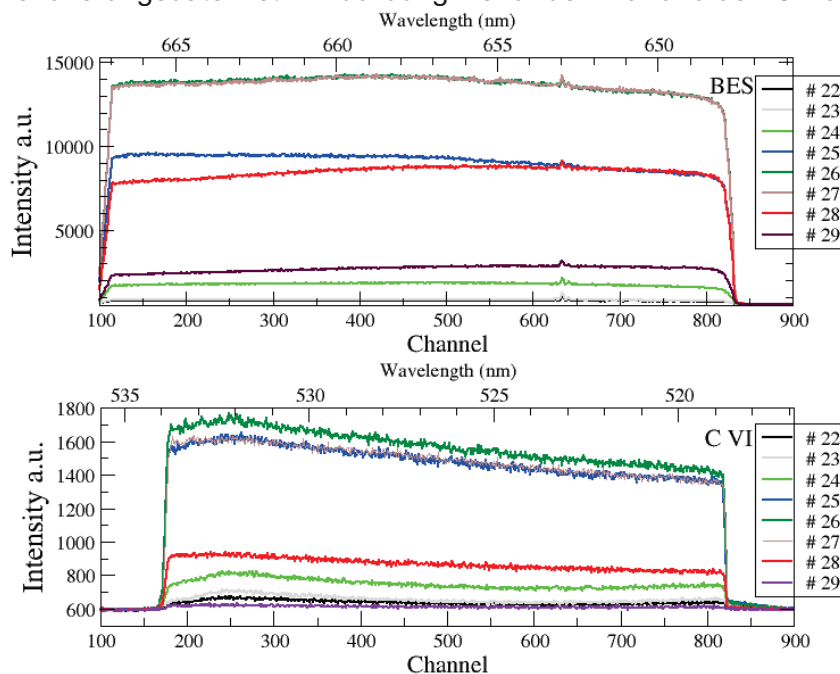


Abb. D6: Intensitätsverteilung für die verschiedenen Lichtleiter für BES und C- Kanal. Kalibrierungsmessung #1000043, $\rho = 0.476\text{-}0.576$ (Lichtleiter #26). Die Messungen wurden sofort nach dem Einbau des Periskops durchgeführt. Die Intensitätsverteilung ist als die Funktion der Kanalnummer (untere X Achse) und der Wellenlänge (obere X Achse) dargestellt. Zeitauflösung ist 70 ms.

Die gemessene Intensität als Funktion der Wellenlänge spiegelt den Intensitätsverlauf der Kalibrierungslampe wider, so dass man jetzt in der Lage ist, Etendue und Transmission des Spektrometers genau zu ermitteln.

Die Etendue von zwei Kanälen normiert auf den C-Kanal sind in Abbildung D7 dargestellt. Die Abbildung zeigt einen relativ homogenen Verlauf der normierten Etendue.

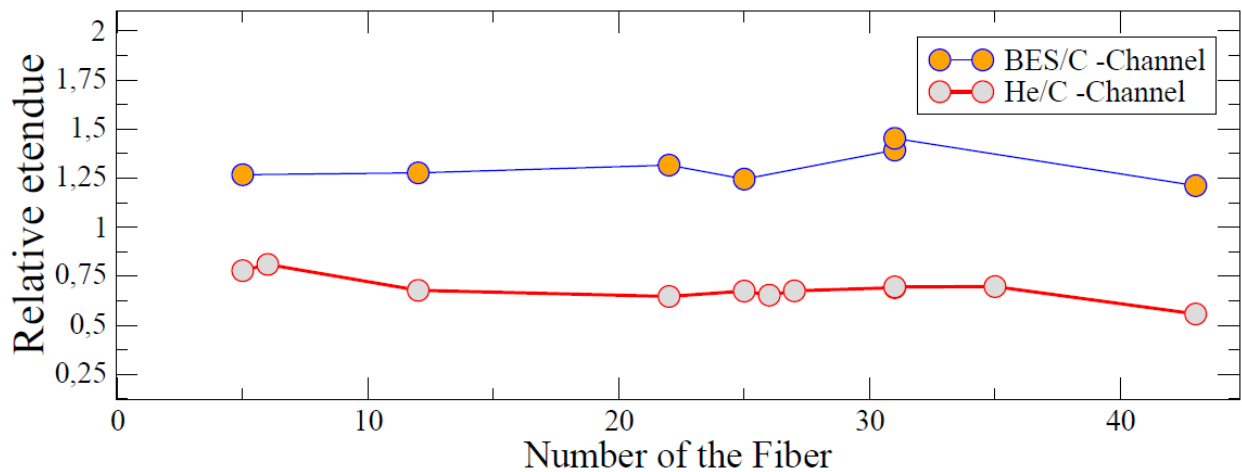


Abb. D7: Etendue für He- und BES- Kanal normiert auf den C-Kanal. Sollwert ist 1.84 für He- und 0.46 für BES Kanal. Quantum Effizienz und Transmission der Lichtleiter wird hier nicht berücksichtigt.

Eine unabhängige Methode zur Überprüfung der relativen Intensitätskalibrierung der Lichtleiterkanäle ergibt sich durch Messungen der passiven H α Linie, welche bei Strahl-Gas-Wechselwirkung angeregt wird. Solche Messungen im Gas ohne Magnetfeld haben sogar den Vorteil, dass keine Starkkomponenten der H α Linie auftreten. Abbildung D8 zeigt die Spektren für verschiedene Lichtleiter für eine Strahl-in-Gas-Messung.

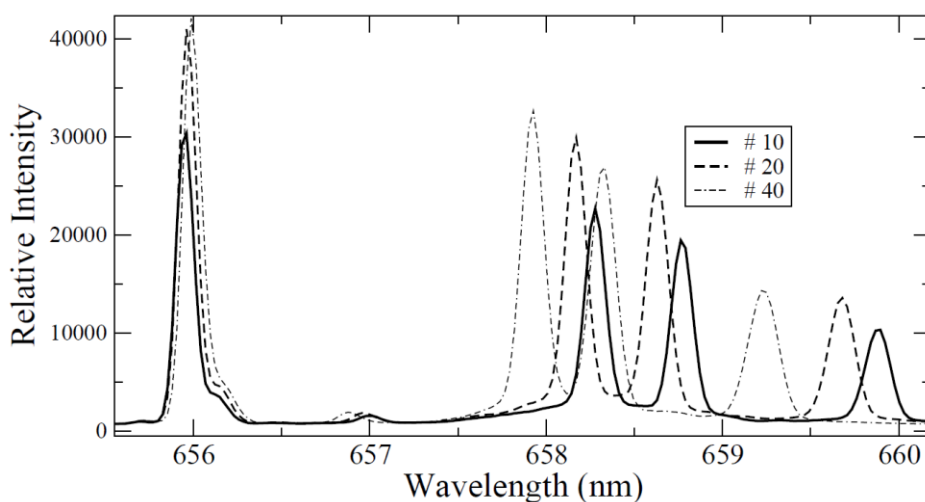


Abb. D8: BES-Kanal. Strahl in Gas #116840, Track=11. Zeitauflösung 70 ms. Position von Lichtleiter #10 ($p=0.2..0.3$), #20 ($p=0.37..0.48$), #40 ($p=0.7..0.8$). Die Spektren zeigen eine unverschobene und verschobene Komponente. Für die Analyse wurde die unverschobene Komponente der H α Linie verwendet.

Abbildung D9 zeigt den Vergleich der relativen Intensitätskalibrierung der Lichtleiter für beide Kalibriermethoden. Die Kalibrierung im Gas hat den Vorteil, dass man für alle Lichtleiter gleichzeitig die Messung durchführen kann. Die Abweichung zwischen beiden Methoden liegt im Bereich von 15 %.

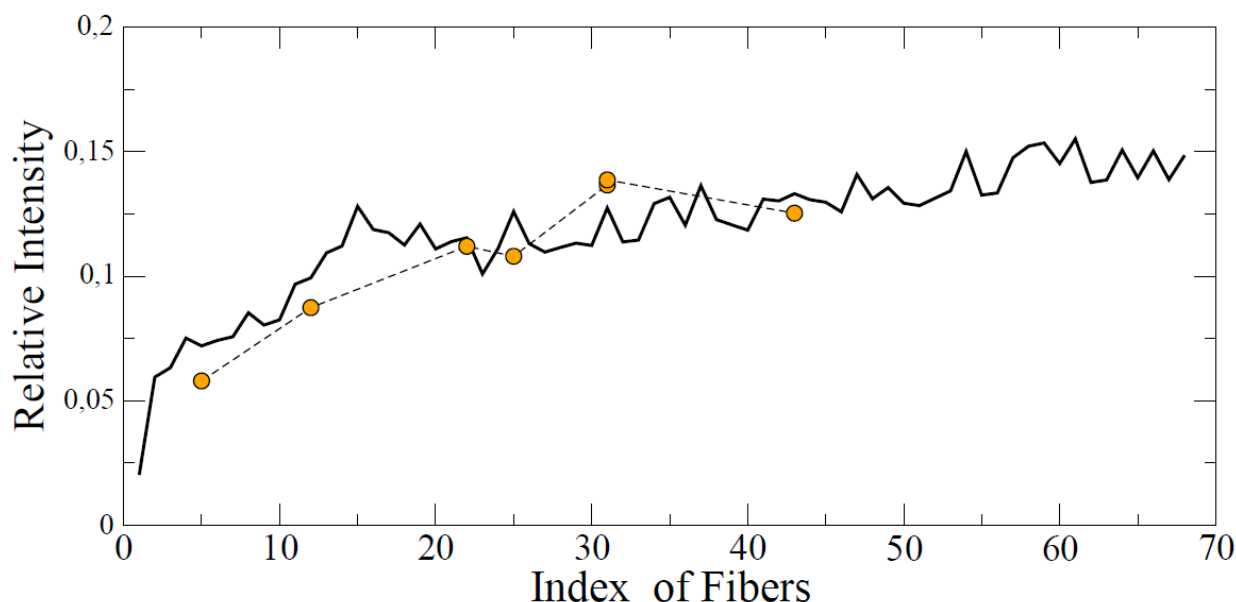


Abb. D9: Vergleich der relativen Kalibrierung zwischen beiden Methoden. In beiden Fällen wird die Intensität normiert, $\sum I = 1$.

Für die Auswertung der Absolutkalibrierung für das Spektrometer werden optische Daten der anderen Komponenten benötigt, wie z.B. die Transmission der optischen Komponenten des Periskops und der Lichtleiter. Die wichtigsten Parameter des Periskops sind in der Tabelle T4 zusammengefasst. Die Daten kommen aus ZEMAX Rechnungen für die optischen Elemente, die oben in Abb. D3 dargestellt sind.

F/#	NA _p /NA _f	L, mm	f _{eff} , mm	k-Faktor	P _{Tr}	d, mm
2.179	0.25/0.22	22.5	116	0.046	0.65	0.3

Tabelle T4: Periskop Eigenschaften, F - ist die F-Zahl; NA_p/NA_f – NA Zahl für das Periskope und Lichtleiter (NA_f < NA_p); S – ist die Spaltbreite, f- Fokallänge, k- ist der Vergrößerungsfaktor, P_{Tr} ist die Transmission vom Periskop, d ist der Lichtleiterdurchmesser. Anzahl der Lichtleiter ist 67. Die Länge der Lichtleiter ist 50 m.

Für die Etendue des Periskops ergibt sich:

$$G = \pi S N A^2 \approx 1.03 \text{ mm}^2 \text{ sr},$$

dabei ist S die Spaltfläche. Damit kann man die Etendue des Spektrometers anhand der folgenden Formel berechnen:

$$R P_{tr} P_f P_s \xi = \frac{\sum N_i \hbar \omega}{\Delta t(s) G x (\text{cm}^2 \text{ sr}) \Delta \lambda (\mu \text{m})},$$

R ist die Spektralstrahldichte, P_f und P_{tr} sind die Transmission von Lichtleiter und Periskop, P_s ist die Transmission des Spektrometers, ξ ist die Photoeffizienz (quantum Effizienz, QE) des Chips, N ist die Anzahl der gemessenen Counts pro Element der Wellenlänge $\Delta \lambda$ für jeden Lichtleiter i , $\hbar \omega$ ist die Energie des Photons, Gx ist die Etendue des Spektrometers, Δt ist das Messzeitintervall. Die Abbildung D10 zeigt die Transmission der verwendeten Komponenten.

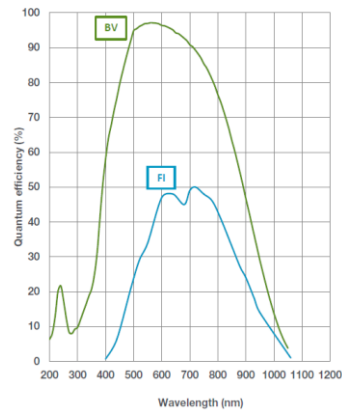
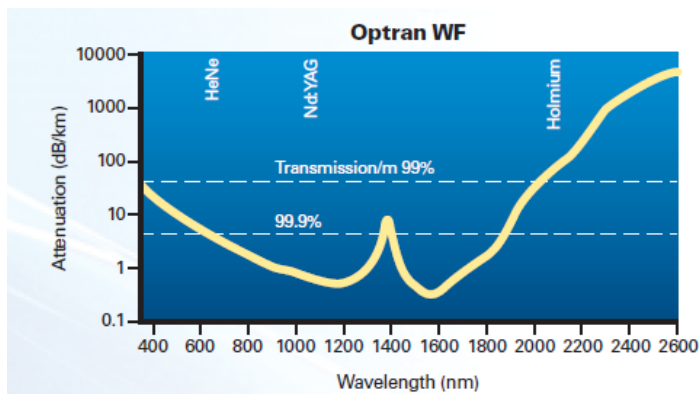


Abb. D10: Links: Transmission der Lichtleiter. Quelle: Ceramoptec, WF 300/330; Rechts: QE Faktor der Kamera IKON-M (ANDOR).

Die folgende Zahlen erhält man für die Etendue ($P_f=0.999^{50}$, $\xi=0.93$ (ikon-M, ANDOR)) des BES Kanals:

$$P_s \times G_x(\text{mm}^2\text{sr}) = 6.62 \times 10^{-7} \sum N_i = \mathbf{0.113}$$

Für den C-Kanal ergibt sich $P_s \times G_x(\text{mm}^2\text{sr}) = \mathbf{0.089}$

Für den He-Kanal folgt $P_s \times G_x(\text{mm}^2\text{sr}) = \mathbf{0.072}$.

Hierbei wurde berücksichtigt, dass die Transmission und die Quanteneffizienz sich für die drei Wellenlängen unterscheiden: $P_f=0.998^{50}$, $\xi=0.95$ (ikon-M, ANDOR) für den C-Kanal und $P_f=0.997^{50}$, $\xi=0.85$ (ikon-M, ANDOR) für den He-Kanal. Die Genauigkeit der Messungen lässt sich mit 30 % abschätzen. Der größte Einzelfehler liegt in der Transmission der Lichtleiter: $(0.997/0.999)^{50} \rightarrow 15\%$. Die Genauigkeit der Quanteneffizienz wird mit 5% angenommen. Den Einfluss der anderen Faktoren kann man mit 10% Genauigkeit abschätzen.

Tabelle T5 fasst die Mess- und Sollwerte der Etendue zusammen:

Kanal	He-	C	BES
Sollwert(mm^2sr)	0.24	0.13	0.06
Istwert(mm^2sr)	0.072	0.089	0.113

Tabelle T5: Etendue des Spektrometers. Die Ungenauigkeit der Messungen liegt unter 30%.

Man sieht, dass die gemessenen Werte im Bereich von der Zahlen der Tabelle T3 liegen. Die beobachteten Abweichungen zwischen Sollwerten und Istwerten sind wahrscheinlich dadurch zu erklären, dass bei der Herstellung der zahlreichen optischen Komponenten des Spektrometers (siehe Abb. D1) Abweichungen zwischen Designwerten und tatsächlich realisierten Werten auftraten, z.B. für die Gittereffizienz oder für die Transmission von Beschichtungen. Insbesondere wurde bei der Beschaffung der Optik aus Kostengründen teilweise auf Standardbeschichtungen zurückgegriffen. Für die Realisierung der endgültigen Spektrometer für ITER CXRS zeigen die hier erzielten Testergebnisse eindeutig, dass der Bereich der benötigten Spezifikationen technisch erreichbar ist. Die Kostenargumente hinsichtlich der Optimierung optischer Bauteile würden bei Fertigung einer Kleinserie (ca. 10 Stück) weniger ins Gewicht fallen, so dass hier eine weitere Optimierungsmöglichkeit gegeben wäre.

Messungen an TEXTOR und ASDEX

Das ITER CXRS Spektrometer wurde am Tokamak TEXTOR und an ASDEX getestet. So zeigt Abb. D11 die ersten gemessenen He-Spektren an ASDEX:

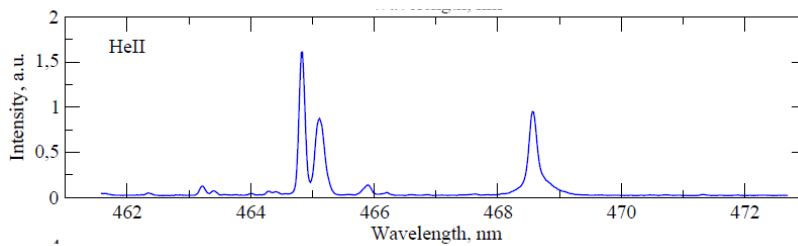


Abb. D11: Die ersten gemessenen Spektren von Tokamak ASDEX. (Messungen von A.Kappatou, R.M.McDermott, R.Dux, R.J.E. Jaspers and the ASDEX Upgrade team)

Anhand der He Spektren konnte das Verhalten und der Transport von He in ASDEX Upgrade erfolgreich untersucht werden (Doktorarbeit von A. Kappatou⁴⁰).

Der BES-Kanal wird bei CXRS Messungen zur Bestimmung der Beamstärke verwendet. Ein Beispiel von BES Spektren an TEXTOR sieht man in Abb. D12.

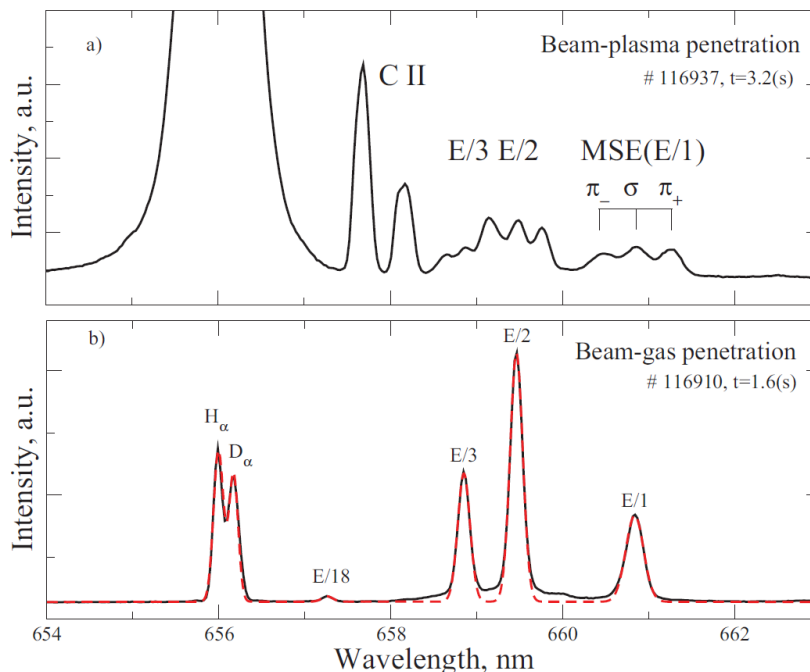


Abb. D12: Beispiel der Messungen von BES-Kanal. a) BES Spektrum für Strahl-Plasma Wechselwirkung, MSE Spektrum. b) BES Spektrum für Strahl-Gas Wechselwirkung⁴¹. Oben: Strahl-Gas-Wechselwirkung; unten: Strahl-Plasma Wechselwirkung.

Abbildung D13 zeigt die gemessene Dichte von Kohlenstoff an TEXTOR.

⁴⁰ A. Kappatou, *Investigations of helium transport in ASDEX Upgrade plasmas with charge exchange recombination spectroscopy*, PhD thesis, TU Eindhoven, 2014

⁴¹ O. Marchuk. et al., AIP- Conf. Proc. 1545 543 (2013)

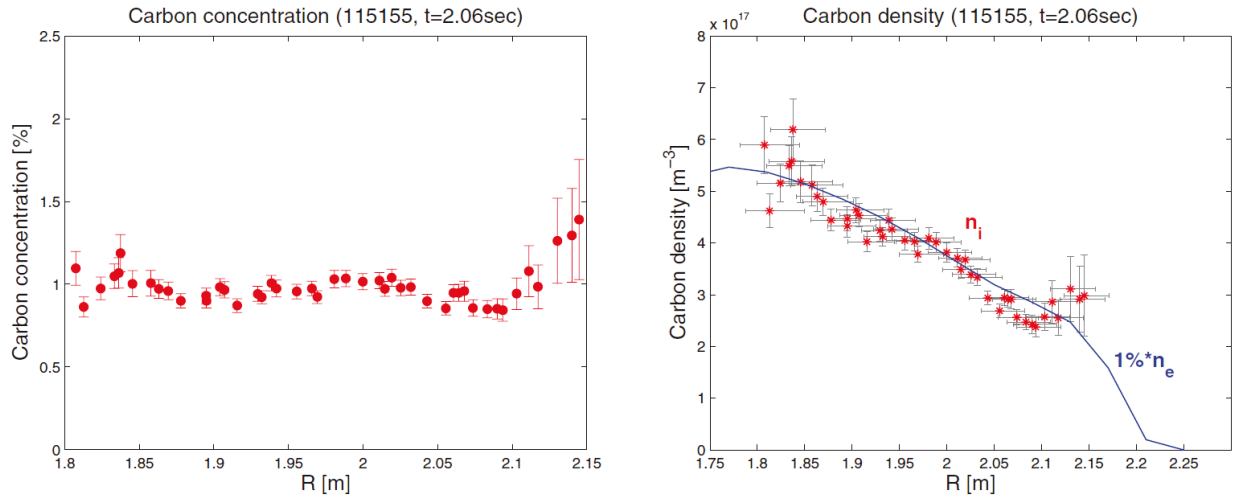


Abb. D13: Die Dichte von Kohlenstoff an TEXTOR. Hier wurde das Signal auf die Bremsstrahlungsmessung normiert⁴².

Eine genaue quantitative Auswertung der experimentellen CXRS Spektren von ITER und anderen Fusionsexperimenten erfordert präzise atomphysikalische Modelle, um die Prozesse Ladungsaustausch und BES korrekt zu beschreiben. Hierzu wurden im Rahmen dieses Projekts umfassende Studien durchgeführt. Die Ergebnisse sind z.B. in der Doktorarbeit von T. Schlummer⁴³ oder der Habilitationsarbeit von O. Marchuk⁴⁴ zu finden. Als Beispiel zeigt die Abbildung D14 die Ergebnisse dieser Modelle im Vergleich zu Messungen vom Tokamak ALCATOR-C MOD.

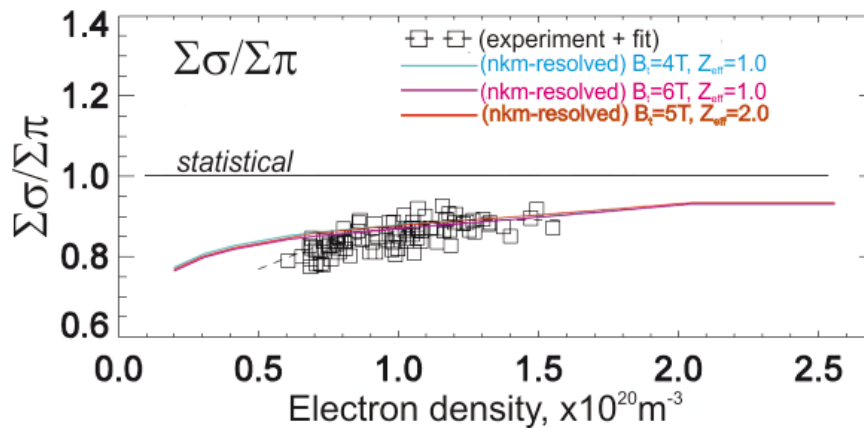


Abb. D14: Vergleich zwischen der Messungen von ALCATOR-C Mod und den Ergebnissen eines verbesserten Stoß-Strahlungsmodells⁴⁵

Der Effekt des Ladungsaustauschs wurde aber auch nicht nur für die Linien in sichtbarem Bereich, sondern erstmals auch im Röntgenbereich untersucht. Abbildung D15 zeigt diese Ergebnisse.

42 A. Kappatou et al. Rev Sci Instrum 83 10D519 (2012)

43 T. Schlummer, *Charge exchange recombination in X-ray spectra of He-like argon measured at the tokamak TEXTOR*, Ph. D Thesis University of Bochum, 2014

44 O. Marchuk, *Excitation and emission of the H α Stark multiplet from fast atoms in fusion Plasmas*, Habilitation Thesis, University of Bochum, 2014

45 I. Bepamyatnov et al., Nuclear Fusion. 53 123010 (2013)

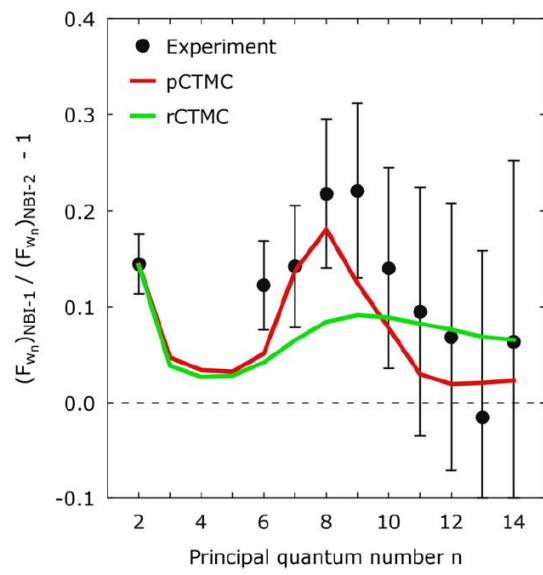
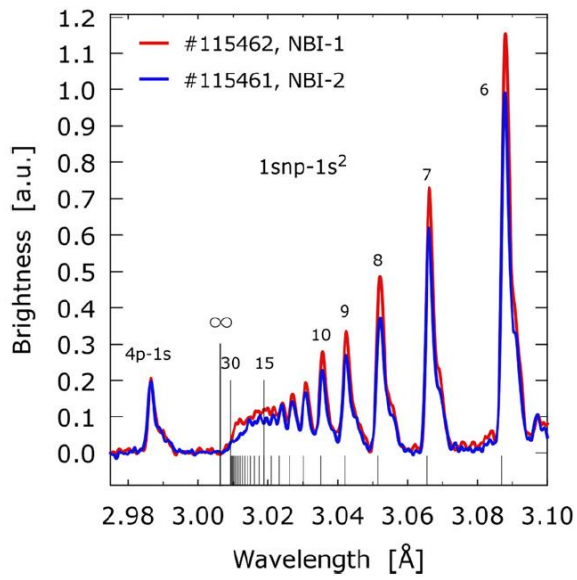


Abb. D15: Links: Ladungsaustauschspektren von Ar im Röntgenbereich; rechts: Verifizierung von Ladungsaustauschstoßstrahlungmodellen am Tokamak TEXTOR⁴⁶

46 T. Schlummer et al., J. Phys. B: At. Mol. and Opt. Phys. 48 144033 (2015)

2. Veröffentlichung der Ergebnisse

O. Marchuk, G. Bertschinger, W. Biel, E. Delabie, M. G. von Hellermann, R. Jaspers and D. Reiter, *Review of atomic data needs for active charge-exchange spectroscopy on ITER*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10F532 (2008)

M. G. von Hellermann, E. Delabie, R. J. E. Jaspers, W. Biel, O. Marchuk, H. P. Summers, A. Whiteford, C. Giroud, N. C. Hawkes, and K. D. Zastrow, *Active Beam Spectroscopy*, AIP Conf. Proc. **988** 165 (2008)

R. J. E. Jaspers, M. G. von Hellermann, E. Delabie, W. Biel, O. Marchuk, and L. Yao, *Validation of the ITER CXRS design by tests on TEXTOR*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10F526 (2008)

E. Delabie, R. J. E. Jaspers, M. G. von Hellermann, S. K. Nielsen, and O. Marchuk, *Charge exchange spectroscopy as a fast ion diagnostic on TEXTOR*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E522 (2008)

W. Biel, *Diagnostik für W7-X und ITER: Herausforderungen und Entwicklungen*, Hauptvortrag DPG Frühjahrstagung, Darmstadt 2008

O. Marchuk, Yu. Ralchenko, R.K. Janev, G. Bertschinger and W. Biel, *Kinetics of highly excited states in Ar¹⁷⁺ charge exchange recombination fusion plasma spectroscopy*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **42** (2009) 165701

N. van der Valk, M. Durkut, et al., *The core CXRS Spectrometer Prototype for ITER*, 26th Symposium on Fusion Technology, 27.09.2010 – 01.10.2010, Porto, Portugal

O. Marchuk, Yu. Ralchenko, R.K. Janev, W. Biel, E. Delabie and A. Urnov, *Collisional excitation and emission of H α Stark multiplet in fusion plasmas*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **43** (2010) 011002

O. Marchuk, Yu. Ralchenko, R.K. Janev, W. Biel, E. Delabie and A. Urnov, *Non-statistical populations of magnetic sublevels of hydrogen beam atoms in fusion plasmas*, Nucl. Instrum and Meth. in Phys. Res. **A 623** (2010) 738

M. von Hellermann, R. Barnsley, W. Biel et al., *Active Beam Spectroscopy for ITER*, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. **A623** (2010) 720

E. Delabie et al., *Consistency of atomic data for the interpretation of beam emission spectra*, Plasma Phys. Contr. Fusion **52** (2010) 125008

T. Schlummer, „Effektive Ratenkoeffizienten für die Ladungsaustauschspektroskopie an H-ähnlichen Argon“, Diplomarbeit, Universität zu Köln, (2010)

W. Biel et al., *Overview on R&D and design activities for the ITER core CXRS diagnostic system*, Fusion Engineering and Design (86) 2011, 548 – 551

O. Marchuk, Yu. Ralchenko, D.R. Schultz, E. Delabie, A.M. Urnov, W. Biel, R.K. Janev and T. Schlummer „Non-statistical simulations for neutral beam spectroscopy in fusion plasmas“ AIP Conf. Proc. **1438** 169 (2012)

O. Marchuk and Yu. Ralchenko, „Populations of excited parabolic states of hydrogen beam in fusion plasmas“ in “Atomic processes in basic and applied physics”, (Eds V.P. Shevelko and H. Tawara), Springer-Verlag, 83 (2012)

O. Marchuk, Yu. Ralchenko and D.R. Schultz, *Non-statistical population distributions for hydrogen beams in fusion plasmas*, Plasma Phys. Contr. Fusion **54** 095010 (2012)

Yu. Ralchenko, O. Marchuk, W. Biel, T. Schlummer, D.R. Schultz and E. Stambulchik, *A non-statistical atomic model for beam emission and motional Stark effect diagnostics in fusion plasmas*, Rev Sci. Instrum. **83**, 10D504 (2012)

A. Kappatou, R. J. E. Jaspers, E. Delabie, O. Marchuk, W. Biel and M. A. Jakobs, *Method to obtain absolute impurity density profiles combining charge exchange and beam emission spectroscopy without absolute intensity calibration*, Rev. Sci. Instrum. **83**, 10D519 (2012)

R. J. E. Jaspers, M. Scheffer, A. Kappatou, N. C. J. van der Valk, M. Durkut, B. Snijders, O. Marchuk, W. Biel, G. I. Pokol, G. Erdei, S. Zoletnik and D. Dunai, *A high etendue spectrometer suitable for core charge eXchange recombination spectroscopy on ITER*, Rev. Sci. Instrum. **83**, 10D515 (2012)

O. Marchuk and the TEXTOR-Team, *H α Spektroskopie an Wasserstoffatomen in Fusionsplasmen: eine Herausforderung der Atomphysik*, Hauptvortrag DPG-Frühjahrestagung, Stuttgart, (2012)

O. Marchuk, Yu. Ralchenko and D.R. Schultz, *Non-statistical population distributions for hydrogen beams in fusion plasmas*, Plasma Phys. Contr. Fusion **54** 095010 (2012)

O. Marchuk, Yu. Ralchenko, D.R. Schultz, W. Biel, T. Schlummer, E. Stambulchik and the TEXTOR-team, *Atomic data for beam-stimulated plasma spectroscopy in fusion plasmas*, ICAMDATA-2012, Gaithersburg MD, USA, 1-3 Okt., AIP Conf. Prof. **1545** 153 (2013)

I.O. Bespamyatnov, W.L. Rowan, K.T. Liao, O. Marchuk, Yu. Ralchenko and R.S. Granetz, *Benchmark of collisional-radiative models for ITER beams at Alcator C-Mod tokamak*, Nucl. Fusion **53** 123010 (2013)

O. Marchuk, *The status of atomic models for beam emission spectroscopy in fusion plasmas*, Phys. Scr. **89** 114010 (2014)

O. Marchuk, *Excitation and emission of the H α Stark multiplet from fast atoms in fusion Plasmas*, Habilitation Thesis, University of Bochum, 2014

T. Schlummer, *Charge exchange recombination in X-ray spectra of He-like argon measured at the tokamak TEXTOR*, Ph. D Thesis University of Bochum, 2014

A. Kappatou, *Investigations of helium transport in ASDEX Upgrade plasmas with charge exchange recombination spectroscopy*, PhD thesis, TU Eindhoven, 2014

T. Schlummer, O. Marchuk, D. Schultz, G. Bertschinger, D. Reiter and W. Biel, *Comparison of effective rate coefficients for high energy charge-exchange with measurements of the Rydberg series of Ar¹⁶⁺ at the tokamak TEXTOR*, J. Phys. B.: At. Mol. And Opt. Phys. **48** 144033 (2015)

Schlussbericht (Sachbericht) zum Teilvorhaben: “ITER Tritium-Retention Diagnostik (TR)”

I. Einleitung

Die Speicherung von Tritium in den das Plasma umgebenden Gefäßwänden ist von kritischer Bedeutung für den Betrieb von ITER. Für das Lizenzierungsverfahren von ITER wie auch für dessen Betrieb oder für den Betrieb eines Fusionsreaktors ist die Bestimmung des absoluten Wertes des Tritium-Inventars und seine Kontrolle unerlässlich. Das gesamte in ITER zurückgehaltene Tritium-Inventar kann nur näherungsweise aus der globalen Gasbilanzanalyse ermittelt werden (kleine Differenz großer Größen). Eine höhere Genauigkeit für den Wert des zurückgehaltenen Tritium-Inventars kann nur experimentell durch *in situ* Messungen an repräsentativen Wandkomponenten erreicht werden.

Dabei zeigen bisherige *post mortem* Messungen an Fusionsanlagen, dass die Ablagerung von Tritium in re-deponierten Schichten sehr inhomogen ist. Durch die lokale Messung des Tritiums können Wandelemente mit hohem Tritium-Inventar identifiziert werden, an denen Reinigungsverfahren gezielt und effizient eingesetzt und dadurch Stillstandszeiten der Fusionsanlage minimiert werden können. Von entscheidender Bedeutung ist weiterhin, dass die Bestimmung des zurückgehaltenen Brennstoffes gegenwärtig nur über eine T-Bilanz in der aktivierten Tritiumphase möglich ist, die Brennstoffeinlagerung aber schon in der Wasserstoffphase gemessen werden muss, um die (physikalischen) Bedingungen für die Rückhaltung zu untersuchen und Methoden ihrer Minimierung zu entwickeln. Beim ITER Design Review 2007 wurde daher die Entwicklung eines entsprechenden Messverfahrens als besonders dringliche Aufgabe identifiziert⁴⁷. Daher wurde auf europäischer Ebene (EFDA) inzwischen eine spezielle Expertengruppe eingerichtet, um Methoden zur Messung des Tritium-Inventars und der Reinigung zu entwickeln. Lasergestützten Methoden wurden dort höchste Priorität eingeräumt.

Folgerichtig wurde in dem Teilvorhaben ITER Tritium-Retention Diagnostik (im Folgenden TR) der Schwerpunkt auf laserbasierte Methoden zur orts aufgelösten quantitativen Messung von Rückhalt von Wasserstoffisotopen in Fusionsmaterialien gelegt.

1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Teilprojektes war es, eine neuartige Diagnostik für ITER zu entwickeln, die die Materialablagerungen an bestimmten ausgesuchten Stellen im Plasmagefäß *in situ* charakterisiert und die absolute Menge des lokalen Tritium-Inventars „online“, d.h. zu einem gegebenen Zeitpunkt gemessen, zur Verfügung stellt. Die durch das FZJ vorgeschlagene neue Messmethode erlaubt die Charakterisierung der Oberflächen der „ersten Wand“, indem mit intensiver Laserstrahlung Wasserstoffisotope durch Desorption oder Atome aus redeponierten Schichten durch Ablation freigesetzt werden, die nach Eintritt in das Plasma *in situ* spektroskopisch gemessen werden. Die Methoden sind entsprechend des zugrundeliegenden Freisetzungsmechanismus benannt. Namentlich wurden die Laserbasierte Ablationsspektroskopie (LIAS) sowie die laserinduzierte Desorptionsspektroskopie (LIDS) untersucht. Zusätzlich wurde die Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) betrachtet. Bei dieser Methode erfolgt die Anregung durch den intensiven Laserpuls selbst, der ein lokales Plasma erzeugt.

Diese drei *in situ* Diagnostiken wurden durch Lasermethoden für die Anwendung im Labormaßstab und zur Probenanalyse komplementiert, namentlich das o.g. LIBS, das sich ebenfalls im Labormaßstab einsetzen lässt, und eine Kombination aus Laserinduzierter Desorption und quantitativem Nachweis mittels Quadrupolmassenspektroskopie (LID-QMS). Gegenstand dieses Projektförderungsantrags war die gezielte technologische Prototypenentwicklung für ein neuartiges Lasersystem sowie Beobachtung zum Betrieb an Fusionsexperimenten, die ebenfalls in der speziellen Umgebung von ITER einsetzbar sind.

⁴⁷ [http://fusionforenergy.europa.eu/documents/F4E\(08\)-GB05-09-Amend_WP_Revised.pdf](http://fusionforenergy.europa.eu/documents/F4E(08)-GB05-09-Amend_WP_Revised.pdf)

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Durch die vorhandene Expertise auf dem Gebiet der Plasma-Wand-Wechselwirkung und Lasertechnologie hat das FZJ eine anerkannt führende Rolle in Europa und weltweit. Für den Projektzeitraum stand mit dem Tokamak TEXTOR ein Großexperiment zur Verfügung, das auf Materialuntersuchungen und Qualifizierung für Fusionsexperimente spezialisiert war. Die vorhandene Limiterschleuse und die optischen und spektroskopischen Beobachtungssysteme, die durch Zukäufe und Entwicklungen innerhalb dieses Projekts komplementiert wurden, ermöglichten eine effiziente Entwicklung neuer Technologien.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung der Arbeiten zur Tritium-Rückhaltung erfolgte in zwei Kategorien: Experimentelle Entwicklungen der laserbasierten Methoden in Laborexperimenten und am Großexperiment TEXTOR sowie Studierenerstellungen zum Einsatz unter den Bedingungen des zukünftigen Experiments ITER.

Für die experimentellen Arbeiten wurde zunächst eine Entscheidung für geeignete Lasersysteme getroffen. Es wurden zwei flexible Lasersysteme gekauft, ein System für Nanosekunden-Pulse und ein Pikosekunden-Pulssystem. Komplementiert durch ein vorhandenes Millisekunden-Pulssystem stand somit eine Spannweite der Laser-Pulslängen von ca. 3×10^8 zur Verfügung.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der wissenschaftlich/technische Stand der im Projekt bearbeiteten Methoden zum Zeitpunkt des Projektbeginns wird hier nach Themenfeldern aufgeschlüsselt skizziert.

- Laserinduzierte Desorption Spektroskopie (LIDS): Aufheizung von Wand- oder Schichtoberflächen zur thermischen Freisetzung von Wasserstoffisotopen während der Plasmaentladung durch Laserpulse mit Pulszeiten von 1-10 ms, ohne dass die Wandoberflächen selbst abgetragen werden, verbunden mit der Messung der absoluten Linienintensität von desorbierten Wasserstoffisotopen im Randschichtplasma^{48,49,50}
- Laserinduzierte Ablation Spektroskopie (Laser Induced Ablation Spectroscopy, LIAS): Schnelle Verdampfung der Schichtablagerungen durch intensive Laserpulse mit Pulszeiten von 5-15 ns. Messung der absoluten Linienintensität der freigesetzten Materialien im Randschichtplasma^{51,52}
- Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS): Schnelle Verdampfung der Schichtablagerungen und Ionisation der freigesetzten Teilchen durch intensive Laserpulse mit Pulszeiten von 5-15 ns. Messung der absoluten Linienintensität der freigesetzten Schichtmaterialien im laser-induzierten Plasma^{53,54,55}.

Eine neuere umfassende Gesamtschau der europäischen Entwicklungen auf diesem Gebiet wurde von V. Philipps et al. veröffentlicht⁵⁶.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die experimentellen Arbeiten wurden von der Arbeitsgruppe am Forschungszentrum Jülich durchgeführt. Durch die BMBF-Mittel konnten Geräte beschafft und Planungs-, Design- und

48 Huber, A. et al, Physica Scripta **T94** 102 (2001)

49 Schweer B. et al., J. Nucl. Mater. **363-365** 1375 (2007)

50 Irrek F. et al., Proc. Annual Meeting Nuclear Technology, Aachen, AMNT-572 (2006)

51 Mertens Ph. et al., Plasma Phys. Control. Fusion **43** A349 (2001)

52 Semerok A. et al., IAEA conference 2006

53 Pospieszczyk A. et al., J. Nucl. Mater. **93&94** 378 (1980)

54 Mertens Ph. et al., J. Nucl. Mater. **241-243** 842 (1997)

55 Mertens Ph. et al., J. Nucl. Mater. **266-269** 884 (1999)

56 V. Philipps et al., Nucl. Fusion **53** (2013) 093002

Fertigungsaufgaben an verschiedene Unternehmen und andere Forschungseinrichtungen vergeben werden.

Eine wissenschaftliche Zusammenarbeit erfolgte u.A. im Rahmen des Erasmus-Mundus Projekts (Masterarbeiten G. A. Beyene, R. Leyte González) sowie einer Dissertation im Rahmen einer Kooperation mit China (Q. Xiao). Eine Ergebnisdiskussion mit internationalen Kollegen erfolgte im Rahmen der IPTA sowie von internationalen Konferenzen.

II. Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Aufgaben des Teilvorhabens „ITER Tritium-Retention Diagnostik (TR)“ gliederten sich in zwei Teilbereiche:

- a) Experimentelle Untersuchungen verschiedener laserbasierter Methoden und Interpretation der Ergebnisse und
- b) Planung und Design geeigneter Aufbauten unter Berücksichtigung der Anforderungen des Tokamaks ITER.

Diese beiden Bereiche a) und b) sind natürlich eng miteinander verwoben. Dennoch werden die Ergebnisse im Folgenden separat dargestellt. Auf Wechselwirkungen wird an den entsprechenden Stellen eingegangen.

Experimentelle Untersuchungen laserbasierter Methoden in Labor und Tokamak

Die hier untersuchten Methoden lassen sich anhand der verwendeten Laserpulsdauer und Nachweismethoden charakterisieren. Dies ist in Tabelle T6 dargestellt:

Methode	Laserpulsdauer (Größenordnung)	Anregung der Licht-Emission	Nachweismethode	Ergebnisse dargestellt in Kap.
Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS)	ns...ps	Laser	Opt. Spektroskopie	a.1
Laserinduzierte Ablations-spektroskopie (LIAS)	ns	Fusionsrandschicht-plasma		a.2
Laserinduzierte Desorptions-spektroskopie (LIDS)	ms	Fusionsrandschicht-plasma		a.3.1
Laserinduzierte Desorption – Quadrupol Massen-spektroskopie (LID-QMS)	ms	Ionisator in Quadrupolmassen-spektrometer	Quadrupol-massen-spektrometrie	a.3.2

Tabelle T6: Übersicht zu den in diesem Teilvorhaben untersuchten Methoden

Die Ergebnisse zu den einzelnen Methoden sind im Folgenden dargestellt.

a.1) Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS)

Beschreibung der Methode:

Bei LIBS wird durch den intensiven ns- oder ps-laser die Probe ablatiert [3, 9, 10] und ein lokales Plasma erzeugt. Von der Linienstrahlung wird auf die Komposition der Probe geschlossen. Diese Methode kann somit in Fusionsexperimenten, aber auch in Labor-experimenten untersucht werden, da keine externe Anregung notwendig ist. Beides wurde im Rahmen dieses Projektes durchgeführt. Die LIBS Prozesse laufen auf einer sehr schnellen Zeitskala von $<1 \mu\text{s}$ ab.

Ergebnisse:

a.1.1.) Untersuchungen von LIBS im Labor

In der ersten Phase des Projekts [7, 13] wurde LIBS hauptsächlich auf gemischten Schichten angewendet, die man in ITER erwartet. Modellsysteme wurden mittels „Magnetron sputtering“ und „Vacuum-Arc-Ionen Deposition“ hergestellt und vor der LIBS Anwendung die Schichtkomposition quantitativ mit Hilfe verschiedener Messtechniken, wie der Nuclear Reaction Analysis (NRA) und der Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (GDOES) analysiert [18, 21]. Es wurde folgende Zusammensetzung ermittelt: C 48,1%, Al 35,3%, W 12,8%, D 3,8%.

Zunächst wurde die LIBS Methode zeitintegriert über den gesamten LIBS Prozess angewendet. Unter diesen Voraussetzungen konnten die relativen Anteile von C und W innerhalb der Schicht quantitativ bestimmt werden. Aus der Analyse wurde ein Anteil von 36,0% C und 27,5% W ermittelt. Die Anwendung dieses Verfahrens auf den Al Anteil zeigte, dass man bei resonanten Emissionslinien oder solchen mit geringer Anregungsenergie größere Fehler bei der quantitativen Bestimmung der Zusammensetzung machen kann. Die Auswahl einer Al II-Emissionslinie (624,3 nm) lieferte einen Al-Gehalt von circa 28,4%. Es zeigte sich, dass die Genauigkeit von LIBS mittels der zeitintegrierten Messung nicht ausreichend ist, um die Anforderungen in ITER zu erfüllen, insbesondere was den Gehalt an Wasserstoffisotopen angeht.

Daher wurde für die zweite Projektphase die Anschaffung von schnellen Kamerasystemen beantragt, um eine zeitaufgelöste Analyse der Plasmaparameter von Dichte und Temperatur über die Zeitdauer des LIBS-Plasmas zu ermöglichen. Die daraus gewonnenen Daten von Elektronendichte und -temperatur (n_e , T_e) legen dann ein geeignetes Zeitfenster für die spektroskopische Analyse fest. Dieses Zeitfenster sollte möglichst klein sein, aber dennoch genug Licht liefern, damit Linienintensitäten mit denen aus Spektroskopiedatenbanken verglichen werden können. Eine hohe Zeitauflösung ist insbesondere notwendig, um den Tritiumgehalt der Wand von dem des Deuteriums bzw. Wasserstoffs spektroskopisch zu trennen. Die gegenwärtige Vorstellung dazu ist, zunächst die Gesamtmenge der Wasserstoffisotope in einem Zeitfenster nach dem Laserpuls zu bestimmen, bei dem die Linienintensität noch hoch ist und sich das „afterglow“-Plasma aufgrund der hohen Elektronendichte noch im lokalen thermischen Gleichgewicht (LTE) befindet.

Um solche Messungen durchführen zu können, wurde von der Firma Hamamatsu basierend auf unseren Vorgaben eine deutlich verbesserte Streak-Kamera entwickelt. Der dynamische Bereich der bisherigen Streak-Kamera wurde um den Faktor 10 verbessert (von 1000:1 zu 10000:1). Das erste Exemplar dieser neuen Kamera wurde daraufhin aus Projektmitteln erworben.

Eine zeitaufgelöste Messung des LIBS-Lichts ist in Abb. E1 gezeigt.

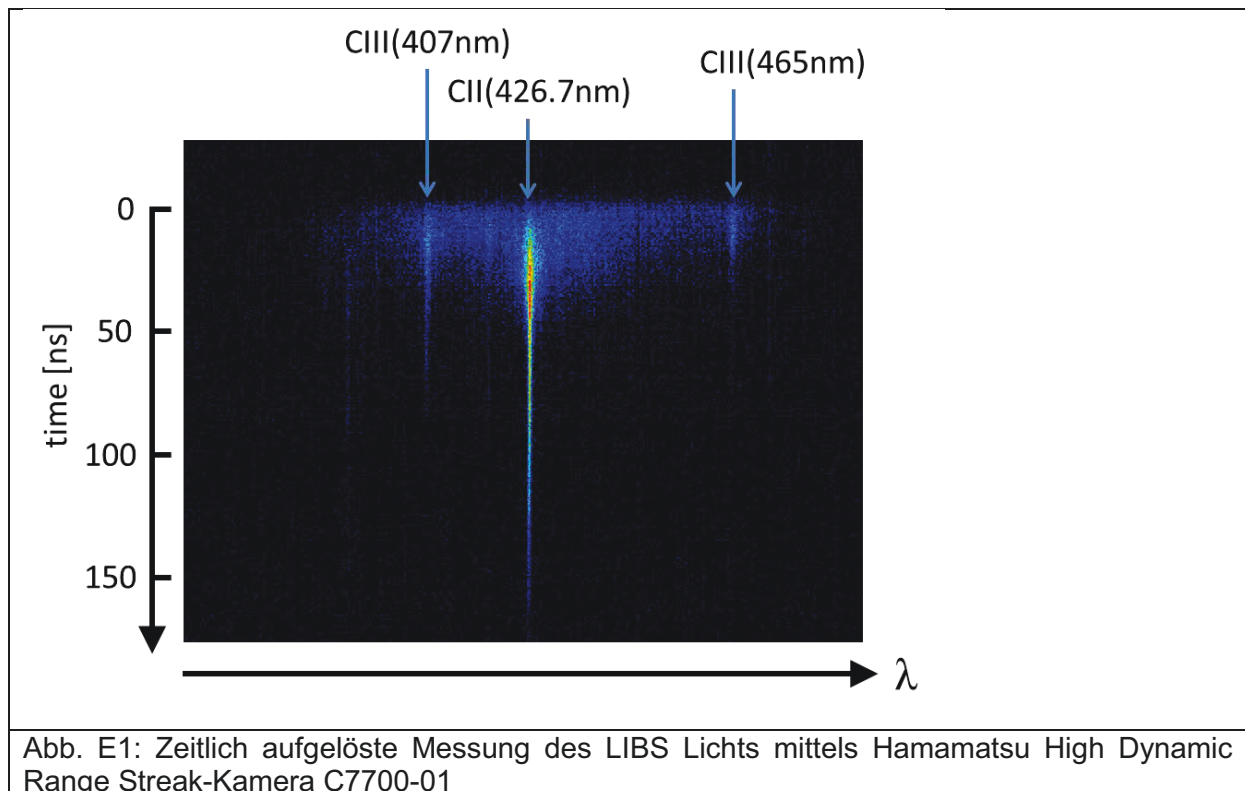


Abb. E1: Zeitlich aufgelöste Messung des LIBS Lichts mittels Hamamatsu High Dynamic Range Streak-Kamera C7700-01

Hierbei wurde ein LIBS-Plasma mittels des 35 ps Lasers ($\lambda = 1064 \text{ nm}$, $E_p = 70 \text{ mJ}$, Durchmesser = 1 mm, Probe hochreines Graphit) erzeugt und Messungen durchgeführt. Die Zeitauflösung der Kamera betrug 10 ns.

Aus den Messungen lässt sich ersehen, dass LIBS-Messungen nach 50 ns möglich sind. Das Maximum der H α -Intensität bei der Abtragung von a-C:D Schichten wurde auf 120 ns nach dem Laserpuls bestimmt.

Es ist zu betonen, dass die Streak-Kamera Einzelereignis-Messungen gerade für Schichten unbekannten Typs ermöglicht, da man bei diesem Betrieb das Zeitfenster der Messung nicht vor der Messung festlegen muss und somit Änderungen erfasst werden. Einschränkend ist zu erwähnen, dass bislang die Lichtausbeute nicht hoch genug war und das Aufaddieren mehrerer Pulse für die dargestellten Daten erforderlich war.

Zur quantitativen Messung der mittels der Streak-Kamera bestimmten Zeitfenster wurden zwei iStar Kameras der Firma Andor angeschafft. Eine Kamera wurde mit Interferenzfilter zur Beobachtung der Emissionsform verwendet. Die zweite Kamera wurde zur gleichzeitigen Beobachtung des LIBS-Lichtes mittels eines Spektrometers verwendet. Gemessene Beispieldaten des Aufbaus sind in Abb. E2 dargestellt. Diese Messungen zeigen, dass mit dem Erwerb der zwei Andor iStar Kameras und der Hamamatsu Streak-Kamera nun hervorragende Beobachtungsmöglichkeiten existieren, die in Zukunft weitere wichtige Messungen zum fundamentalen Verständnis des LIBS Prozesses für die Anwendung in der Fusionsforschung liefern können.

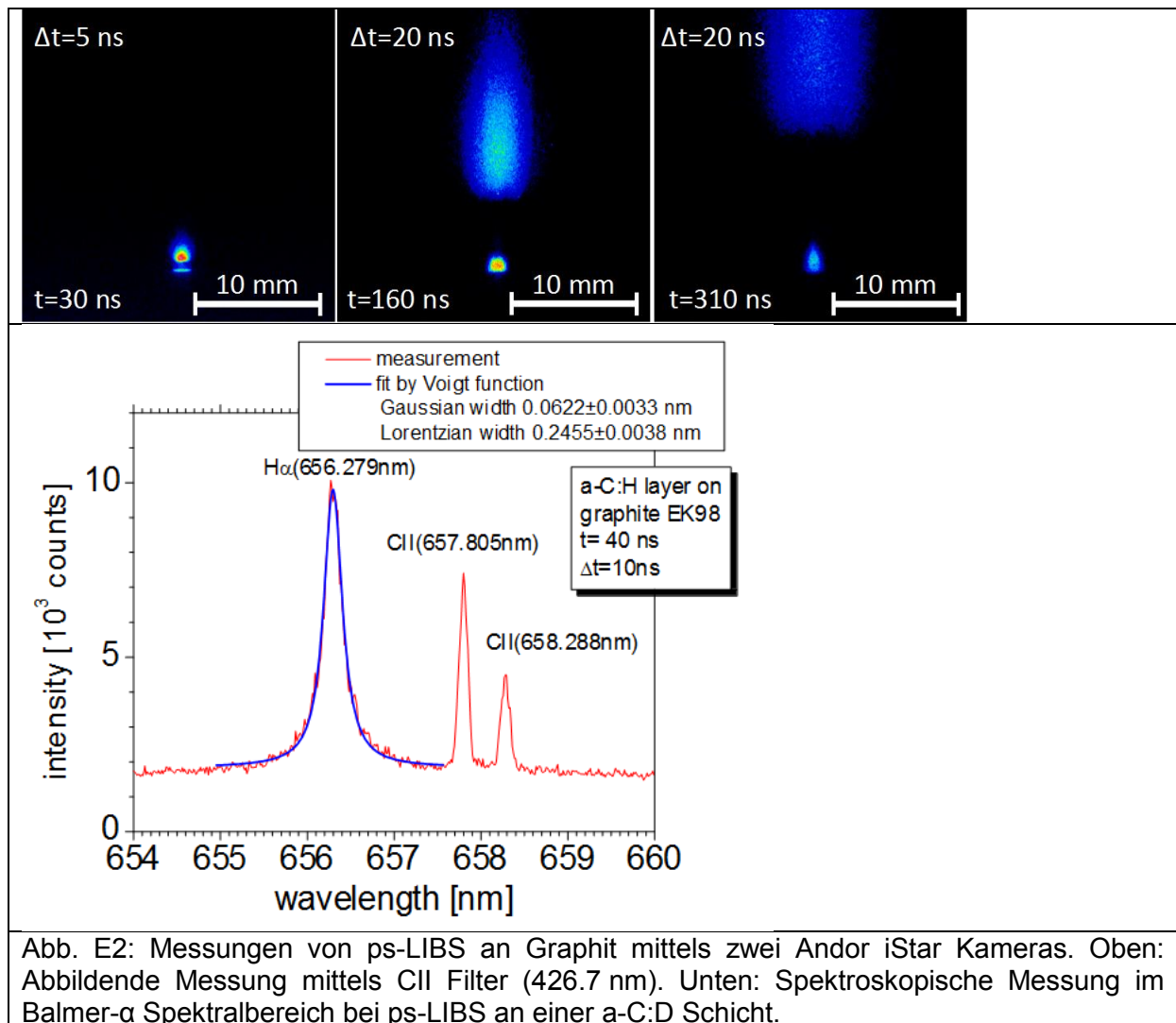
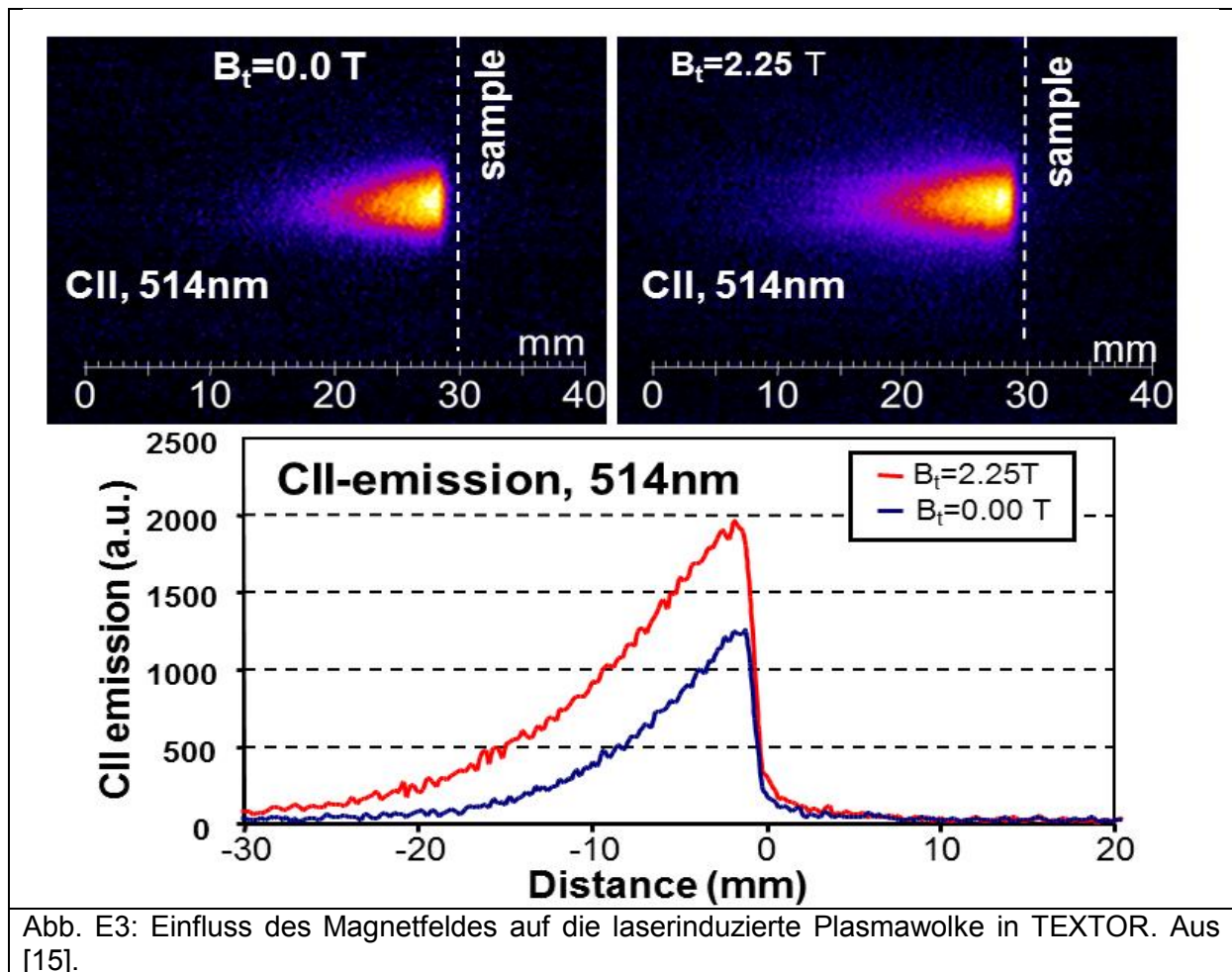


Abb. E2: Messungen von ps-LIBS an Graphit mittels zwei Andor iStar Kameras. Oben: Abbildende Messung mittels CII Filter (426.7 nm). Unten: Spektroskopische Messung im Balmer- α Spektralbereich bei ps-LIBS an einer a-C:D Schicht.

a.1.2.) LIBS Untersuchungen im Tokamak TEXTOR

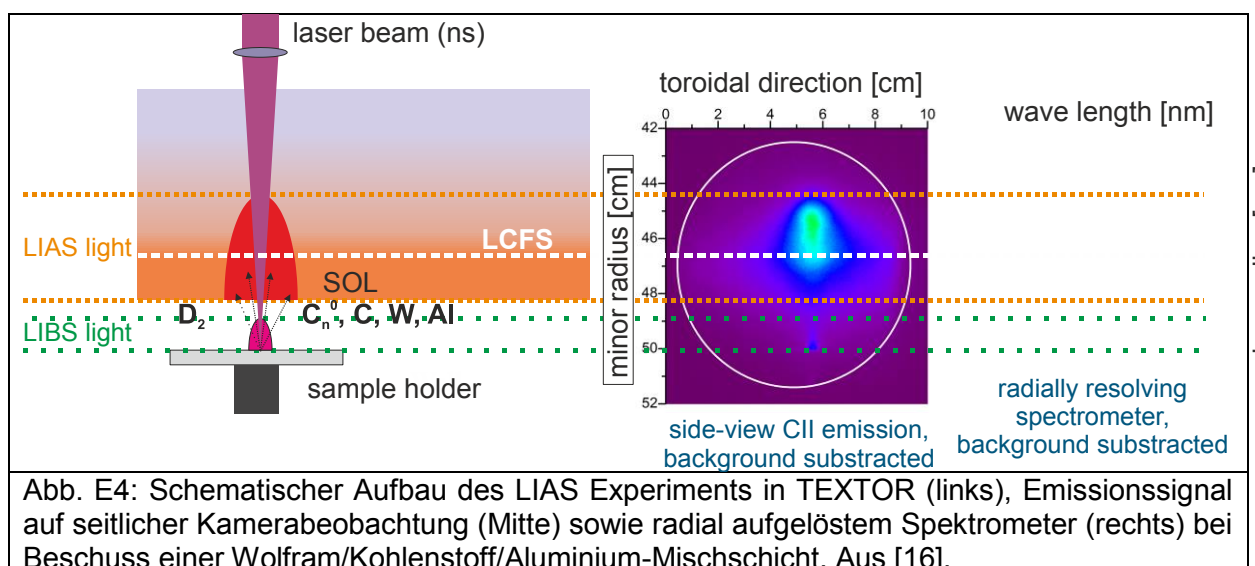
Neben den oben geschilderten Eigenschaften ergibt sich eine Herausforderung vom Einsatz von LIBS in der Fusion durch den Einfluss des magnetischen Feldes auf den LIBS Prozess [15, 23]. Daher wurde eine Studie über den Einfluss von Magnetfeldern auf die LIBS Plasmen bis zu 2,5 T an TEXTOR bei einem Basisdruck von ca. 10^{-4} Pa durchgeführt. Der Laserstrahl wurde auf eine Graphitprobe (EK98) in der TEXTOR Limitschleuse fokussiert. Abbildung E3 zeigt die CII Lichtemission (514 nm, $2s2p(^3P^o)3s - 2s2p(^3P^o)3p$) von LIBS-Plasmen ohne und mit dem Magnetfeld ($B_t = 2.25$ T). Das LIBS-Plasma in einem Magnetfeld von 2.25 T zeigt etwa 50 % Steigerung in der CII-Emissionsintensität (siehe die Intensität entlang der Probenoberfläche in dem unteren Bild der Abb. E3 integriert). Darüber hinaus ist eine Erhöhung der Größe der laserinduzierten Plasmawolke von etwa 6 mm bis 10 mm beobachtet worden [11]. Die ersten LIBS Experimente in Anwesenheit des Magnetfeldes zeigen keine Verschlechterung der Empfindlichkeit der LIBS-Technik. Die CII-Emission zeigt keine Reduktion [23]. Es sind jedoch weitere Studien für die Anwendung der LIBS Methode erforderlich, um den Einfluss der im Tokamak vorherrschenden Magnetfelder auf die Eigenschaften der laserinduzierten Plasmen zu untersuchen.



a.2) Laserinduzierte Ablationsspektroskopie (LIAS)

Beschreibung der Methode:

Bei vorhandenem Plasma in einem Fusionsexperiment wird mittels eines leistungsstarken ns-Laserpuls das zu untersuchende Material ablatiert. Die Ablationsprodukte dringen in die Randschicht des Plasmas ein und werden angeregt und ionisiert, im Falle von Molekülen und Clustern dissoziiert [8, 16]. Mittels quantitativer spektroskopischer Betrachtung wird die emittierte Linienstrahlung beobachtet. Dies ist in Abb. E4 schematisch sowie anhand von Messdaten dargestellt.



Ergebnisse:

Im Rahmen der LIAS Qualifikation an TEXTOR wurde das Wasserstoffinventar an a-C:D Schichten mittels NRA qualifiziert. In TEXTOR wurden diese Proben abgetragen und mittels radiometrisch kalibrierter Kamerabeobachtung und Spektroskopie der Balmer α Photonenfluss bestimmt [22]. Ein Vergleich von LIAS-Photonenfluss und Deuteriuminventar der Proben ist in Abb. E5 gezeigt.

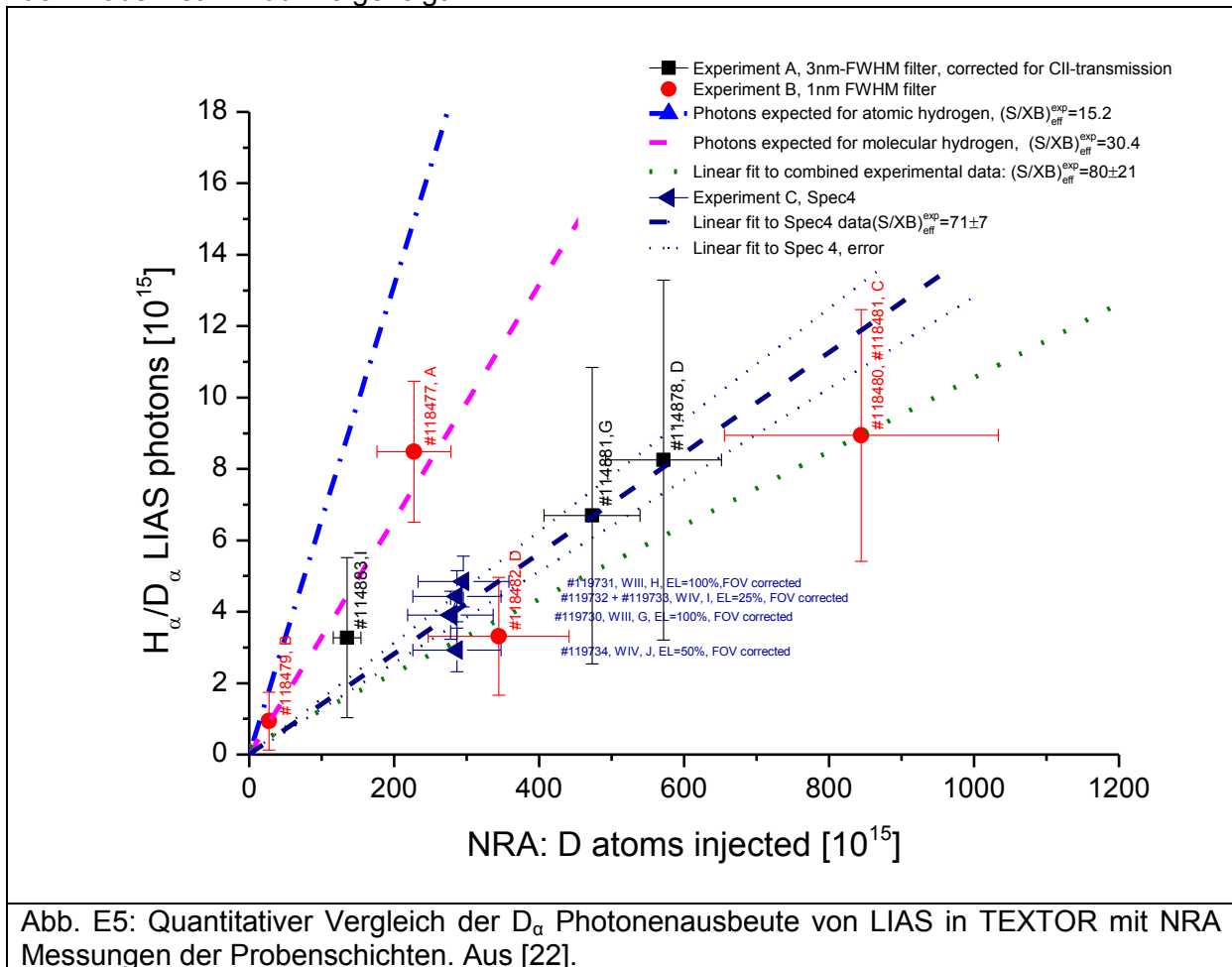


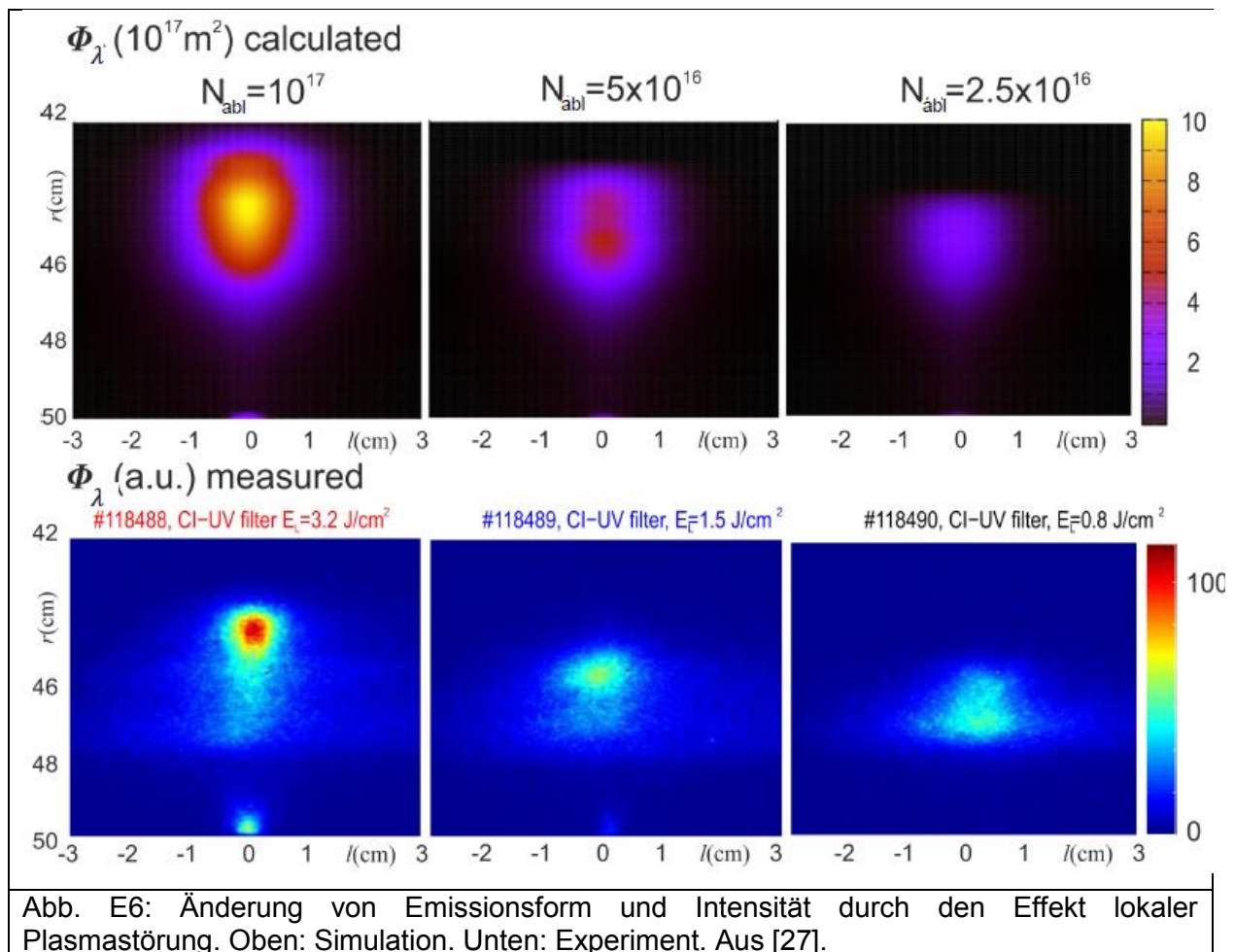
Abb. E5: Quantitativer Vergleich der D_α Photonen ausbeute von LIAS in TEXTOR mit NRA Messungen der Probenschichten. Aus [22].

Für Experiment B wird die Genauigkeit von NRA erreicht, für die spektroskopische Beobachtung in Experiment C übertroffen. Allerdings lässt sich der beobachtete Photonenfluss quantitativ nicht mit einem einfachen Modell für LIAS [24], bestehend aus der Konkurrenz zwischen Strahlungsanregung und Ionisation, erklären. Die Diskrepanz zwischen diesem einfachen Modell und den Messungen kann entweder durch die komplexe Dissoziationschemie der hier verwendeten amorphen Kohlenwasserstoffschichten, lokale Plasmastörung durch das ablatierte Material oder eine Mischung beider Effekte erklärt werden [19]. Daher wurden Experimente zur Untersuchung des Einflusses der lokalen Plasmastörung durchgeführt. Um diese Messungen mit einem ebenfalls im Rahmen dieses Projekts erstellten Modells vergleichen zu können, ist eine Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung der ablatierten Spezies erforderlich. Mittels der im BMBF-Projekt 03FUS0020 beschafften schnellen Kamera war die Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung in TEXTOR möglich: Aus den Kameradaten ließ sich für die Ablation von Wolfram in TEXTOR eine Schwerpunktgeschwindigkeit von 7.6 ± 0.2 km/s ermitteln. Für Ablation an Graphit wurde die Schwerpunktgeschwindigkeit auf 8.8 ± 0.3 km/s bestimmt [25].

Die so ermittelten Geschwindigkeitsverteilungen erlauben eine Beschreibung des LIAS Prozesses, ohne den sehr komplexen Ablationsprozess im Detail modellieren zu müssen. Zur Beschreibung der Wechselwirkung des in die Randschicht einströmenden Materials wurde ein Modell entwickelt, welches eine selbstkonsistente Beschreibung der Ausbreitung der ablatierten Atome und der lokalen und zeitlich stark veränderlichen

Plasmarandschichtparameter liefert [26, 27].

Ein Vergleich von gemessener und mittels dieses Modells simulierter Emission ist in Abb. E6 für verschiedene ablatierte Materialmengen gezeigt.



Zur weiteren Entwicklung der LIAS-Methode und des beschreibenden Modells sowie zur Anwendung von LIAS-Messungen zur Charakterisierung von Plasma-Wand-Wechselwirkungsprozessen sind Experimente am Tokamak EAST sowie W7-X in Planung.

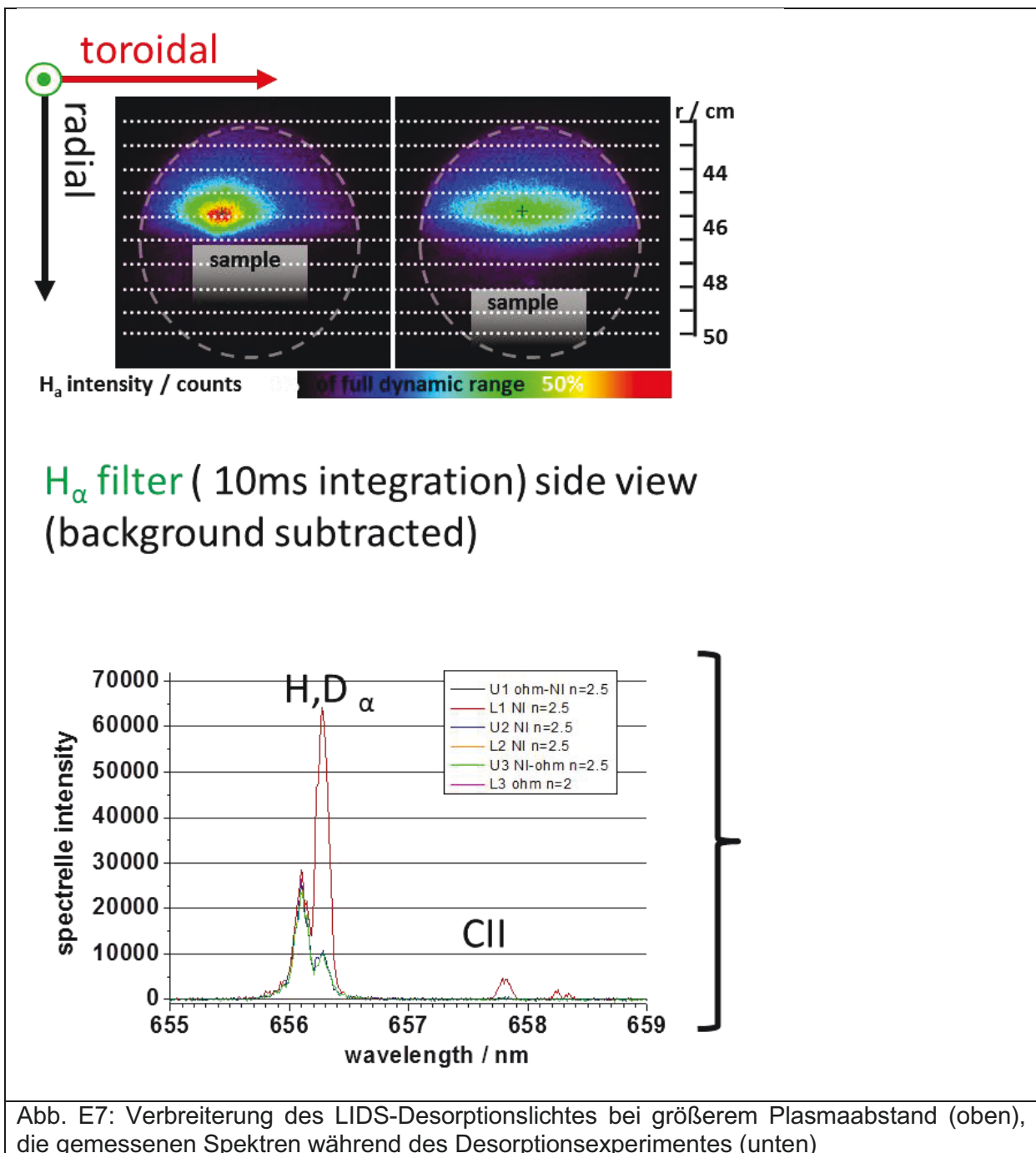
a.3.1) Laserinduzierte Desorptionsspektroskopie (LIDS)

Beschreibung der Methode:

Der experimentelle Aufbau entspricht dem Aufbau von LIAS (a.2). Allerdings wird bei LIDS ein ms-Laser eingesetzt, der zur thermischen Desorption führt. Somit wird nicht die ganze Probe abgetragen, sondern der Wasserstoff mittels eines thermischen Prozesses freigesetzt.

Ergebnisse:

Es konnte im Rahmen dieses Projektes gezeigt werden, dass LIDS in Kombination mit dem ebenfalls im Rahmen dieses Projekts entwickelten coaxialen Beobachtungssystems (vgl. Abschnitt b.1) eine zuverlässige Methode für die absolute Bestimmung der Wasserstoffisotope auf der ersten Wand in Tokamaks ist [14, 18]. In TEXTOR-Experimenten wurden unter verschiedenen Plasmabedingungen quantitative LIDS-Messungen durchgeführt. Die Experimente (siehe Abb. E7) zeigten ein Verhältnis des H_α -Signals während des Laserpulses zum Hintergrundsignal von etwa 15:1. Bei geeigneter Wahl der Laserenergie zeigt das gesamte Spektrum nur die Emissionslinien von Wasserstoff, ein Nachweis, dass keine signifikante Abtragung des eigentlichen Wandmaterials durch die Laserbestrahlung erfolgt.



Die untere Nachweisgrenze von LIDS hängt sehr stark von dem Hintergrund der H_α Strahlung ab. Der Hintergrund seinerseits hängt sehr stark von der Geometrie und den Plasmabedingungen sowie insbesondere von den Fluktuationen der Plasmaemission auf den Zeitskalen des jeweiligen zum Nachweis genutzen Emissionsprozesses ab. Der Hintergrund in TEXTOR erfolgt durch Emission des Deuteriumplasmas. Die laserinduzierte Emission wird durch H_α Strahlung dominiert. Mittels der Untergrundsubtraktionsmethode wurden für Ohm'sche Entladungen eine Nachweisgrenze von 3×10^{21} H Atome/m² und für Neutralteilcheninjektor-beheizte Entladungen eine Nachweisgrenze von 4×10^{21} H Atome/m² bestimmt [14].

a.3.2) Laserinduzierte Desorption – Quadrupol Massenspektroskopie (LID-QMS)

Beschreibung der Methode:

Bei LID-QMS wird mittels eines ms-Lasers [20] die zu untersuchende Stelle erhitzt. Dies führt zur Desorption der eingelagerten Wasserstoffisotope. Die Desorption findet in einer

Vakuumkammer statt, ein Schieber zum Vakuumpumpensystem ist für die Messdauer geschlossen. Somit entspricht der Anstieg im Deuteriumpartialdruck der Vakuumkammer bei bekanntem Kammervolumen der Menge der eingelagerten Atome. Dieser Partialdruck wird mittels eines kalibrierten Quadrupolmassenspektrometers bestimmt [6, 12].

Ergebnisse:

Beim Vergleich von LIDS und LID-QMS konnte eine Übereinstimmung der Inventarbestimmung mit einer Genauigkeit von 10% erzielt werden. Der Vergleich mit NRA liefert ähnlich gute Übereinstimmung für dünne Schichten. Eine weiterhin zu untersuchende Fragestellung ist die Diffusion von Wasserstoffisotopen tiefer in das Material im Falle von Wolfram, falls eine Erhitzung unterhalb des Schmelzpunkts durchgeführt wird. LID-QMS ist eine gut geeignete Methode zur *in situ* Untersuchung von Proben in heißen Zellen. Die Entwicklung wird im Rahmen des BMBF-Projektes 03FUS0020 fortgesetzt.

b) Planung und Design geeigneter Aufbauten unter Berücksichtigung der Anforderungen des Tokamaks ITER

b.1) Optisches Design einer Apparatur für die Strahlführung und zum optischen Beobachtungssystem der TR-Laserdiagnostik

Der optische Entwurf für die ITER-ähnliche Strahlführung des TR-Lasers und die gleichzeitige Messung der absoluten Linienintensität wurde vom Jülicher Projekt-Team vorbereitet. Mit der Ausarbeitung dieses Entwurfes und der Detaillierung des optischen Designs für die Laserstrahlführung wurde die Firma OptoPrecision beauftragt. Durch Verwendung des ZEMAX Programms unter Berücksichtigung der Randbedingungen für den Einsatz von Hochleistungslasersystemen im Wellenlängenbereich von UV bis NIR wurden den Anforderungen entsprechende optische Systeme entwickelt und berechnet. Die vorgeschlagene technische Lösung wurde vom Projekt-Team akzeptiert. Ein Demonstrationsaufbau wurde durch die Firma erstellt (siehe Abb. E8) und im Juni 2011 an das FZJ geliefert. Der Akzeptanztest erfolgte im Sommer 2011, der Einbau und die Inbetriebnahme des ITER-ähnlichen Strahlführungssystems an TEXTOR wurde im September 2011 durchgeführt.

ITER like coaxial observation system for TEXTOR application

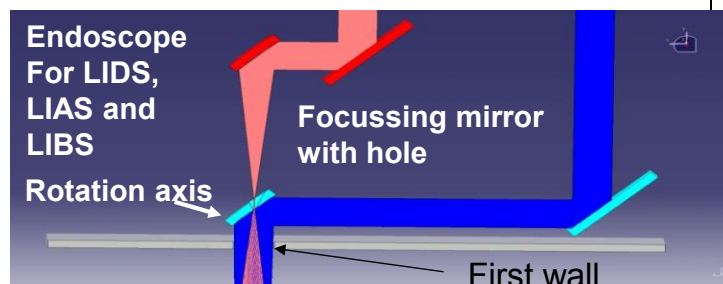
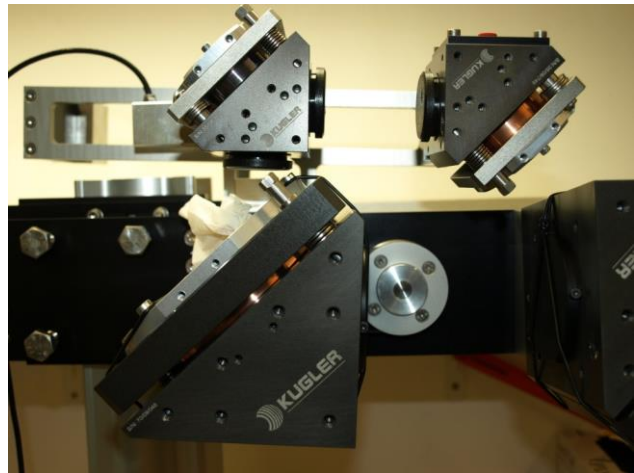
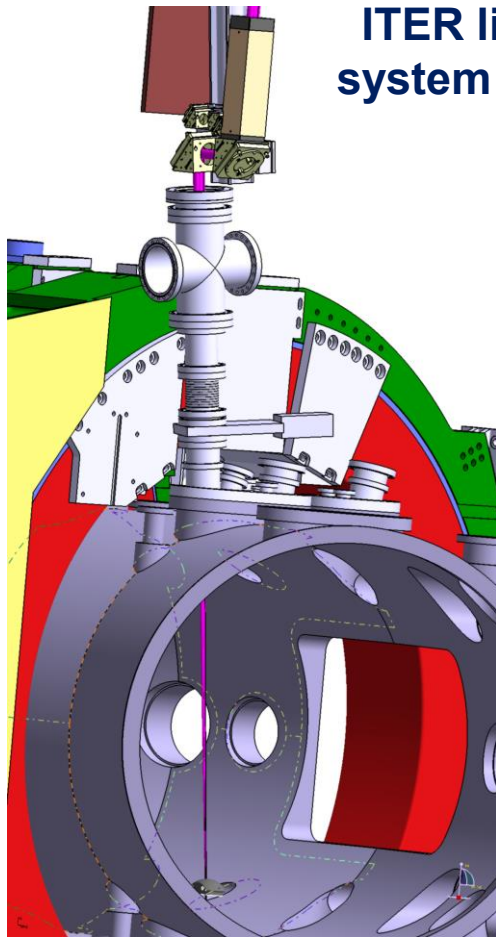


Abb. A8: Details des optischen Testaufbaus an TEXTOR

Das System besteht aus vier Kupferspiegeln, die die Lenkung des Anregungs- sowie des Nachweisstrahlengangs übernehmen. Hierbei übernimmt der fest auf der Hauptplatte montierte erste Spiegel die erste Ablenkung des ankommenden Anregungsstrahlengangs um 90° auf den zweiten Spiegel. Der erste Spiegel bewirkt zusätzlich die Fokussierung des Strahls auf einen Punkt innerhalb des Torus.

Der zweite Spiegel ist als Planspiegel ausgelegt und dient der Umlenkung des Anregungsstrahlengangs durch den Flansch in den Torus. Er ist um seine Mittenachse (jeweils senkrecht zu beiden Teilen des abgelenkten Anregungsstrahlengangs) in toroidaler Richtung drehbar gelagert, sodass der Fokus entlang einer Linie um $\pm 50\text{mm}$ auf der Wandprobe im Torus positioniert werden kann.

Der zweite Spiegel besitzt mittig eine 6 mm durchmessende Bohrung. Der erste und zweite Spiegel besitzen einen Durchmesser von jeweils 100 mm, von denen durch die Halterung 70 mm für den Anregungsstrahlengang verfügbar sind.

Der dritte Spiegel ist ebenfalls ein Planspiegel, der das von der Probe ankommende Licht auf den vierten Spiegel umlenkt.

Der vierte Spiegel fokussiert das durch die Bohrung im zweiten Spiegel aufgefangene Licht auf den Eingang eines Lichtleiters mit dem Durchmesser 0,6 mm. Dieser führt das Licht zu einem Spektrometer, welches zur Detektion von aus der Wandprobe gelösten Elementen eingesetzt wird. Die Halterung des SMA 905 Fasersteckers wird direkt auf die Ausgangsseite des Spiegelhalters geschraubt und positioniert das Faserende bereits im Fokus des vierten Spiegels.

Das System erlaubt folgende Bewegungen:

- 1) Toroidale Richtung:
 - ± 50 mm bezogen auf die Mittellage in der Ebene
 - Wiederholgenauigkeit zum Wiederanlaufen einer ehemaligen Position: $\pm 0,5$ mm
- 2) Senkrecht zur toroidalen Richtung (poloidal):
 - ± 40 mm bezogen auf die Mittenachse der Probe

Die ersten Experimente an TEXTOR mit dem Koaxialsystem wurden Ende 2011 durchgeführt. Für die Steuerung des Strahlenganges in toroidaler Richtung wurde ein Aktuator (Piezo-Prinzip) verwendet. Der Aktuator wurde von einem Controller gesteuert.

Dieses System fand Einsatz für LIBS, LIAS und LIDS, vgl. Abschnitte II.1.a1-3).

b.2) Ebenfalls durch die Firma OptoPrecision wurde ein ITER relevantes Design für die Strahlführung und zum optischen Beobachtungssystem der Tritium-Retention-Laserdiagnostik erstellt. Hierbei wurde der Schwerpunkt auf die Umgebungsanforderungen in ITER gelegt, namentlich Betrieb unter Vakuumbedingungen, hohe Strahlenbelastung und Einsatz bei starkem Magnetfeld. Der Auftrag wurde im 2. Halbjahr 2012 abgeschlossen.

ITER-relevantes Optik-Design: F&E Auftrag: "Weiterführende Konzeptstudien für Laserstrahlführung und Beobachtungsoptik an ITER"

Die oben beschriebenen Entwicklungsarbeiten zur Laserstrahlführung der *in situ* Tritium-Retention-Diagnostik (TR) basieren auf einem technischen Konzept, das nicht vakuumkompatibel ist. Die optischen Komponenten der Strahlführung des TR-Lasers bei der jetzigen Anordnung befinden sich außerhalb des Vakuumgefäßes. Die Anwendung der Methode in ITER verlangt aber den Einsatz der Optik direkt im Vakuum. Für die Kontrolle des Strahlenganges muss an ITER auch der Aktuator direkt im Vakuum eingesetzt werden.

Für die Auslegung und Herstellung eines vakuumkompatiblen Koaxialsystems wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein weiterer FE Auftrag an eine Firma geplant.

Folgende Aufgaben und Tätigkeiten wurden für diesen Auftrag festgelegt:

- Analyse und Design komplexer optischer Systeme (mit dem Programm ZEMAX).
- Herstellung von optischen Komponenten mit hoher Präzision im Wellenlängenbereich vom VUV bis NIR.
- Verwendung von Hochleistungs-Lasersystemen im Wellenlängenbereich von UV bis NIR.
- Berechnung des Verhaltens von Strukturkomponenten unter thermischen und mechanischen Belastungen (Finite-Elemente-Methode (FEM)).
- Einsatz von Systemen in einer Ultrahochvakuum (UHV)-Umgebung.
- Verwendung hochredundanter Steuerungen.
- Die Beobachtung soll eine gute räumliche Auflösung, besser als 1 mm auf der Probenebene aufweisen.
- Die optischen Komponenten müssen mit Temperaturen von 200°C - 350°C kompatibel sein.
- Die Antriebsmechanik soll mittels gekühlter Piezo-Technik realisiert werden.

Für die Realisierung wurde eine koaxiale Anordnung des Laserinjektion- und Beobachtungssystems vorgeschlagen [2].

Zunächst wurde eine Vorstudie zur Planung der Machbarkeit im Rahmen dieses Teilvorhabens vergeben. Ziel der Studie war die Ausarbeitung geeigneter Konzeptstudien und Vorbereitung eines Projektplanes einschließlich einer Kostenplanung. Die Studie ergab, dass das geplante System technisch machbar ist, dass aber die laut Antragstellung verfügbaren Mittel bei weitem nicht ausreichen, um das vollständige System zu entwickeln

und einen Testaufbau zu erstellen. Die Durchführung der Gesamtentwicklung musste daher im Rahmen dieses Teilvorhabens zurückgestellt werden, und es wurde stattdessen innerhalb des Nachfolgeprojekts 03FUS0020 die Entwicklung der kritischsten Einzelkomponente, eines präzisionsverstellbaren Spiegels, gestartet. Diese Entwicklungsarbeiten laufen zur Zeit und werden voraussichtlich Ende 2015 abgeschlossen.

2. Veröffentlichungen der Ergebnisse

- [1] B. Schweer et al., *Laser techniques implementation for wall surface characterisation and conditioning*, Phys. Scr. T138 (2009) 014008 (7pp)
- [2] B. Schweer et al, *Journal of Nuclear Materials* 390–391 (2009) 576–580
- [3] G. A. Beyene, *Experiments on Laser Ablation of Pure & Carbon Coated Graphite Using Q-Switched Ruby Laser*, Erasmus Mundus Master of Nuclear Fusion Science and Engineering Physics, Masterarbeit, 2009
- [4] B. Schweer et al, *First wall surface characterisation with laser based methods*, 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA Vol.33E, P-1.188 (2009)
- [5] B. Schweer, G. Beyene, S. Brezinsek, N. Gierse, A. Huber, F. Irrek, V. Kotov, V. Philipps, U. Samm and M. Zlobinski, *Laser techniques implementation for wall surface characterization and conditioning*, Phys. Script. 2009 014008
- [6] M. Zlobinski, *Laserinduzierte Desorption an plasmaerzeugten Wandbeschichtungen*, Diplomarbeit Heinrich-Heine Universität Düsseldorf, März 2009
- [7] O. Karger, *Messung des Spektrums eines laserinduzierten Plasmas an einer Graphitoberfläche*, Bachelor-Arbeit, Heinrich-Heine Universität, Düsseldorf, Februar 2010.
- [8] N. Gierse, B. Schweer, A. Huber, O. Karger, V. Philipps, U. Samm, G. Sergienko, *In situ characterisation of hydrocarbon layers in TEXTOR by laser induced ablation and laser induced breakdown spectroscopy*, J. Nucl. Mater. 415, Issue 1, Supplement, 2011, Pages S1195-S1198
- [9] N. Gierse, *Laser Induced Ablation Spectroscopy (LIAS) On Graphite For Fusion Application*, Diplomarbeit, Universität zu Köln, May 2010.
- [10] D. Ivanova, M. Rubel, V. Philipps, B. Schweer, A. Huber, N. Gierse, P. Petersson, *Laser-based and thermal methods for fuel removal and cleaning of plasma-facing components*, Journal of Nuclear Materials Volume 415 (2011) S801-S804
- [11] Huber, B. Schweer, V. Philipps, N. Gierse, M. Zlobinski, S. Brezinsek, W. Biel, V. Kotov, R. Leyte-Gonzales, Ph. Mertens, U. Samm, *Development of laser-based diagnostics for surface characterisation of wall components in fusion devices*, Fusion Engineering and Design Volume 86, Issues 6–8, October 2011, Pages 1336–1340
- [12] M. Zlobinski, V. Philipps, B. Schweer, A. Huber, S. Brezinsek, Ch. Schulz, S. Möller, U. Samm and the TEXTOR Team, *Laser Induced Desorption as Tritium Retention Diagnostic in ITER*, Fusion Engineering and Design, Volume 86, Issues 6–8, October 2011, Pages 1332–1335.
- [13] R. Leyte González, *Analysis and composition of wall material and fuel retention by means of LIBS*, Masterarbeit, Erasmus Mundus Master of Nuclear Fusion Science and Engineering Physics, 2011.
- [14] M. Zlobinski, V. Philipps, B. Schweer, A. Huber, H. Stoschus, S. Brezinsek, U. Samm and the TEXTOR-Team, PFMC-Konferenz, *In situ Measurements of Fuel Retention by Laser Induced Desorption Spectroscopy (LIDS) in TEXTOR*, Phys. Scr. T145 (2011) 014027
- [15] Huber, A., B. Schweer, V. Philipps, R. Leyte-Gonzales, N. Gierse, M. Zlobinski, S. Brezinsek, V. Kotov, Ph. Mertens, U. Samm, G. Sergienko, *Study of the feasibility of applying laser-induced breakdown spectroscopy for in-situ characterization of deposited layers in fusion devices*, Phys. Scr. T145 (2011) 014028 (5pp).
- [16] N. Gierse, S. Brezinsek, T. F. Giesen, A. Huber, M. Laengner, S. Möller, R. Leyte-Gonzales, L. Marot, E. Meyer, M. Naiim-Habib, V. Philipps, A. Pospieszczyk, G. Sergienko, B. Schweer, M. Zlobinski, U. Samm and the TEXTOR Team, *Characterisation of hydrocarbon and mixed layers in TEXTOR by Laser Induced Ablation Spectroscopy*, Phys. Scr. T145 (2011) 014026 (4pp)
- [17] Q. Xiao, A. Huber, B. Schweer, Ph. Mertens, V. Philipps, H. Ding, G. Sergienko, A. Kubina: *Application of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for characterisation of material deposits and tritium retention in fusion devices*, Fusion Engineering and Design 88 (2013) 1813– 1817

- [18] V. Philipps, A. Malaquias, A. Hakola, J. Karhunen, G. Maddaluno, S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, E. Fortuna, P. Gasior, M. Kubkowska, A. Czarnecka, M. Laan, A. Lissovski, P. Paris, H.J. van der Meiden, P. Petersson, M. Rubel, A. Huber, M. Zlobinski, B. Schweer, N. Gierse, Q. Xiao and G. Sergienko, *Development of laser-based techniques for in situ characterization of the first wall in ITER and future fusion devices*, Nucl. Fusion 53 (2013) 093002 (12pp)
- [19] N. Gierse et al., *In situ Deuterium inventory measurements of a-C:D layers on tungsten in TEXTOR by laser induced ablation spectroscopy (LIAS)*, Phys. Scr. T 159 (2014) 014054
- [20] Huber, A. et al., *Investigation of the impact of transient heat loads applied by laser irradiation on ITER-grade tungsten*, Phys. Scr. T158 (2014) 014005
- [21] Q. Xiao, A. Huber, V. Philipps, G. Sergienko, N. Gierse, P. Mertens, R. Hai and H. Ding, *Analysis and removal of ITER relevant materials and deposits by laser ablation*, Journal of Nuclear Materials 455 (2014) 180-184
- [22] N. Gierse, *Assessment of Laser Induced Ablation Spectroscopy (LIAS) as a method for quantitative in situ surface diagnostic in plasma environments*, Dissertation Universität zu Köln, 2014, Schriften des Forschungszentrums Jülich : Reihe Energie & Umwelt; 231 Forschungszentrum Jülich GmbH, <http://kups.ub.uni-koeln.de/id/eprint/5771>
- [23] Q. Xiao, R. Hai, H. Ding, A. Huber, V. Philipps, N. Gierse, G. Sergienko et al., *In situ analysis of the first wall by laser-induced breakdown spectroscopy in the TEXTOR tokamak: dependence on the magnetic field strength*, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 911–914
- [24] N. Gierse, *Laserablation zur Echtzeitcharakterisierung der Wand in Fusionsexperimenten*, Hauptvortrag auf der DPG Frühjahrstagung, 03. März 2015, Bochum.
- [25] Gierse, N.; Tokar, M. Z.; Brezinsek, S.; Giesen, T. F.; Hubeny, M.; Huber, A.; Philipps, V.; Pospieszczyk, A.; Sergienko, G.; Wegner, J.; Xiao, Q.; Samm, U.; Linsmeier, Ch.; the TEXTOR team, *Time resolved imaging of Laser Induced Ablation Spectroscopy (LIAS) in TEXTOR and comparison with modelling*, 15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (PFMC15), submitted to Physica Scripta
- [26] M.Z.Tokar, N.Gierse, A.Huber, V.Philipps, and U.Samm, *Model for plasma distortion by laser-induced ablation spectroscopy*, 41st EPS Conference on Plasma Physics, euophys-ics conference abstracts Vol. 38F (June 2014), available online: <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P2.028.pdf>
- [27] M.Z. Tokar, N.Gierse, V.Philipps, U.Samm, *Modeling of plasma distortions by laser induced ablation spectroscopy (LIAS) and implications for interpretation of LIAS measurements*, submitted to Nuclear Fusion.

Schlussbericht (Sachbericht) zum Teilvorhaben: “ Disruption Mitigation Ventil (DMV)”

I Einleitung

1. Aufgabenstellung

Disruptionen sind schnelle, ungeplante Stromabrisse eines Tokamakplasmas. Es gibt mehrere unterschiedliche Ursachen, die letztendlich zu einem instabilen Betriebszustand führen, der dann mit einer Disruption endet. Die Folgen einer Disruption sind (i) hohe Wärmelasten auf plasmabegrenzenden Bauteilen, (ii) große Kräfte auf das Vakuumgefäß infolge induzierter Wirbelströme, und (iii) die mögliche Erzeugung hochenergetischer Elektronen (*Runaway-Elektronen*), die beim Auftreffen auf die Wand des Tokamaks zu Beschädigungen führen können.

Nach derzeitigem Stand der Forschung scheint es möglich zu sein, die Anzahl und Häufigkeit von Disruptionen deutlich zu verkleinern, es ist derzeit aber noch nicht möglich, Disruptionen komplett zu vermeiden. Die negativen Folgen einer Disruption nehmen mit der Maschinengröße deutlich zu. An ITER können Disruptionen zum Schmelzen der inneren Metallwand führen und bis zu 70 % des Plasmastroms in Runaway-Elektronen konvertieren, deren Energie sehr lokal auf der Wand deponiert werden kann. Als notwendige Maßnahme in ITER ist daher die Abschwächung von Disruptionen vorgesehen. Die dafür vorgesehene Methode ist die Injektion einer großen Menge Gas (*Massive Gasinjektion*) in das Plasma. Als Folge wird eine Disruption kontrolliert eingeleitet. Bei dieser Art der durch einen Strahlungskollaps hervorgerufenen Disruption wird ein großer Teil der Plasmaenergie gleichmäßig auf die gesamte Wandfläche abgestrahlt, wobei die pro Flächeneinheit deponierte Energie unterhalb der Schädigungsgrenze bleiben soll. Da das Plasma keine vertikale Versetzung erfährt, werden die Kräfte minimiert. Aufgrund der hohen Gasdichte nimmt die Stoßfrequenz der Elektronen zu und verhindert so die Beschleunigung auf relativistische Energien und die Schädigung der ersten Wand.

Zielsetzung dieses Teilprojekts war die Entwicklung eines schnellen Gasventils, welches die ITER-Anforderungen erfüllt⁵⁷. Insbesondere muss dieses Ventil eine ausreichende Menge Gas (bis zu 200 bar × l) in wenigen Millisekunden in das Plasma injizieren, aufgrund des Tritiums metallgedichtet sein, und die verwendeten Materialien müssen resistent gegenüber der Neutronenbestrahlung sein.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Schnelle Ventile zur Gasinjektion während Disruptionen werden an mehreren Tokamaks weltweit eingesetzt bzw. sind in Vorbereitung (JET, TEXTOR, ASDEX-Upgrade, Tore Supra, DIII-D, Alcator C-Mod). Meistens basieren diese Ventile auf einem ferromagnetischen Antrieb oder sind nicht für den Durchsatz großer Gasmengen konzipiert. Die verwendeten Dichtungstechnologien sind nicht für Tritiumbetrieb geeignet. Durch die Vielzahl der verwendeten Systeme gibt es eine große Datenbasis, mit deren Hilfe die Eigenschaften der schnellen Gasinjektion und die Qualität der Folgenabschwächung gut bekannt sind und zu größeren Anlagen extrapoliert werden können.

An ITER sind nach derzeitigem Planungsstand vier Positionen für Disruptionsabschwächungs-Systeme vorgesehen. Ein entsprechender Entwicklungsauftrag wurde zwischenzeitlich von der ITER Organisation an den amerikanischen ITER-Partner vergeben.

57 ITER Dokument BEJQWA
V1.2 „SRD-18-DM (Disruption Mitigation System)“

Bei der Entwicklung ist das Oak Ridge National Laboratory (ORNL) federführend. Ziel der Arbeiten ist die Konzeption eines *Shattered Pellet* Injektors. Pellets sind gefrorene Kügelchen aus einem Edelgas (Neon oder Argon). Diese werden mit einer Zentrifuge oder durch Gasdruck gegen eine Prallplatte geschossen, wobei sich das Pellet auflöst und ein ähnlicher Effekt wie bei der schnellen Gasinjektion eintritt. Im Vergleich mit der schnellen Gasinjektion ist ein derartiges System noch nicht weit entwickelt und nur am amerikanischen Tokamak D-IIID im Einsatz. Von der ITER-Organisation sind als *Backup*-Lösung weiterhin Ventile zur schnellen Gasinjektion vorgesehen.

Am Forschungszentrum Jülich wurden in der Vergangenheit Ventile mit kurzer Ansprechzeit und hohem Gasdurchsatz entwickelt. Der Ventilmechanismus wurde patentiert⁵⁸. Die Eigenschaften dieser Ventile sind zurzeit weltweit einzigartig und entsprechen in den Grundeigenschaften den ITER Anforderungen. Am Forschungszentrum Jülich wurden viele Ventile unterschiedlicher Größe gebaut, im Labor vermessen und an verschiedenen europäischen Tokamaks eingesetzt⁵⁹.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Prototypen, der alle für den Einsatz an ITER benötigten Eigenschaften besitzt. Kritische Komponenten wie die Dichtung des Injektionsvolumens, die Kolbendichtung, der Wirbelstromantrieb und die Bremse sollten in speziellen Laboraufbauten getestet werden. Zu Beginn des Projekts wurde im Rahmen eines F&E Auftrags an ein Unternehmen die prinzipielle Machbarkeit eines Ventils in der für ITER notwendigen Größe gezeigt. Eine Masterarbeit untersuchte die Realisierbarkeit des Antriebs. Entwicklung, Konstruktion, Berechnungen und Labortests wurden im FZ Jülich und in Zusammenarbeit mit einem weiteren Unternehmen im Rahmen eines F&E Auftrags durchgeführt und ausgewertet.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Entwicklung des DMV Prototypen basiert auf einem am Forschungszentrum Jülich entwickelten und patentierten Ventiltyp⁵⁸. Dieser besitzt eine kurze Reaktionszeit und ist unempfindlich gegenüber Magnetfeldern. Diese Eigenschaften in Kombination mit der hohen Menge des injizierten Gases⁶⁰ setzen sich im internationalen Vergleich deutlich von anderen Entwicklungen ab.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Jülicher Ventiltyp wird an JET (EFDA, Culham, UK) und MAST (UKAEA, Culham, UK) eingesetzt. Es besteht ein enger Kontakt zum ITER Team im Bereich Disruptionen und *Plasma Fuelling*. Das DMV Projekt ist international einmalig und wurde seitens des ITER Teams sehr begrüßt (vgl. oben unter 2.).

⁵⁸ G. Mank et al., Europäisches Patent EP1380781 (2003)

⁵⁹ An TEXTOR wurden gleichzeitig drei Ventile betrieben, ein Ventil befindet sich am Tokamak MAST in Culham, ein Ventil an JET in Culham. Während der Projektlaufzeit wurde ein weiteres Ventil für JET gebaut, sowie nach der Stilllegung von TEXTOR ein dort eingesetztes Ventil zur weiteren Verwendung zu JET transferiert.

⁶⁰ Das speziell für JET entworfene und gebaute Ventil kann bis zu 80 bar Gas injizieren.

II. Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Eine Konzeptstudie wurde im Rahmen eines F&E Auftrags durch eine Technologiefirma erstellt. Die Studie sollte sich am Prinzip eines für TEXTOR entwickelten und im Einsatz befindlichen Ventils orientieren. Für den Einsatz an ITER muss die Menge des injizierten Gases deutlich erhöht werden und alle eingesetzten Materialien müssen für hohe Neutronenflüsse und Strahlenbelastungen tauglich sein. Im Rahmen dieser Konzeptstudie wurden folgende Arbeiten durchgeführt: Es wurde ein integriertes Modell aufgesetzt, welches die elektromagnetischen, mechanischen und strömungsdynamischen Vorgänge im Ventil beschreibt. Zur Simulation dieser Vorgänge wurde die Software Simulink genutzt. Das Ventil besteht aus zwei Kammern, der Injektionskammer und einer Kompressionskammer mit der Aufgabe, die Stößelbewegung abzufangen (Abb. F1). Der Stößel selber wird mit Hilfe einer Spule angetrieben, die im Stößelteller Wirbelströme induziert und dadurch eine abstoßende Kraft erzeugt. Diese elektrodynamischen Vorgänge und das Magnetfeld wurden mit Hilfe der Software CST für jeden einzelnen Bewegungsschritt des Stößels berechnet. Diese Berechnungen wurden für verschiedene Abstände zwischen Antriebsteller und Spule durchgeführt und damit die resultierende Kraft als Funktion der Zeit und des Abstandes ermittelt. Dieses Ergebnis zusammen mit den aus der Gaskompression resultierenden Kräften und dem Druck in der Injektionskammer diente als Grundlage für die Berechnung der Stößelbewegung.

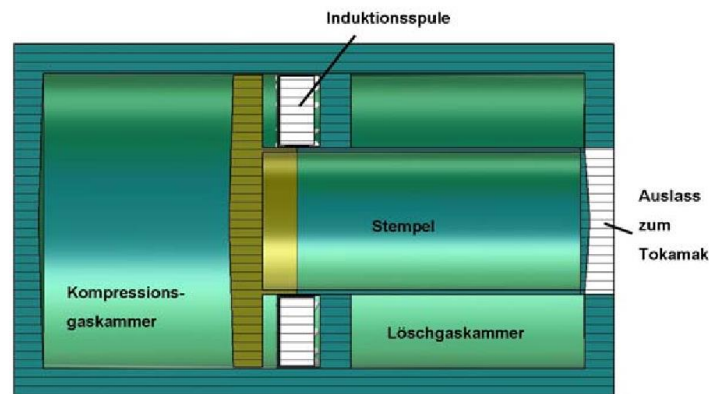


Abb. F1: Modell des Ventils in Simulink

Mit Hilfe von Simulink wurden die das System beschreibenden gekoppelten Differentialgleichungen gelöst und ein Bewegungsablauf erstellt. Es konnte gezeigt werden, dass mit den gewählten Parametern (Ventilvolumen 10 l, Gasdruck 200 bar, Auslassdurchmesser 100 mm) die in den Spezifikationen geforderte Gasmenge von $5 \times 10^5 \text{ Pam}^3$ in 5 Millisekunden injiziert werden kann, wenn 4 solcher Ventile zum Einsatz kommen⁶¹. Allerdings wurden mit Hilfe des Modells auch mechanische Spitzenlasten erkannt. Zum einen treten beim Abbremsvorgang hohe Kräfte auf die Rückwand des Ventils und die Antriebsscheibe des Stößels auf. Die resultierenden mechanischen Belastungen könnten zur Materialermüdung führen. Zum anderen ist die Stößelgeschwindigkeit zurzeit noch sehr hoch, wenn der Stößel wieder die Schließposition erreicht (60 m/s). Eine solche Geschwindigkeit würde zu Schädigungen führen und muss durch Einstellen der Ventilparameter heruntersgesetzt werden. Die Ergebnisse weiterer Simulationen mit geänderten Parametern (Schließgasdruck) führen zu kleineren Endgeschwindigkeiten (11 m/s) sowie kleineren Kräften im Umkehrpunkt, jedoch wird zumeist die Verschlusszeit erhöht, was sich in einer größeren Menge an nachfließendem Gas niederschlägt.

Das Modell wurde mit Hilfe der Messdaten eines kleineren Ventils überprüft, das zuvor

⁶¹ Die für ITER anvisierte Gasmenge hat sich im Projektzeitraum geändert, deshalb sind Inkonsistenzen mit späteren Werten nicht auszuschließen.

konstruiert und getestet wurde⁶². Es konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung in Bezug auf Stromverlauf und Stößelbewegung festgestellt werden. Allerdings ist der Gasfluss im Modell im Vergleich zum Experiment ungefähr doppelt so schnell. Das Simulink Modell berücksichtigt kein turbulentes Strömungsverhalten, welches den Gasausfluss verlangsamt. Der Einfluss des magnetischen Kraftpulses auf den Stempelkopf wurde mittels einer strukturellen Simulation in ANSYS evaluiert. Das Programm berechnet die Verformung des Stempels bei der vorliegenden Krafteinwirkung. Die aus Simulink gewonnene Kurve der Gesamtkraft, die sich für die erste Millisekunde ergibt, wurde in ANSYS übertragen. Die Kraft wirkt auf die hintere Fläche des Stempelkopfes. Der Stempelschaft wurde bei der Simulation festgehalten, da ansonsten keine Verformung auftreten würde. Somit stellt die Simulation eine obere Abschätzung der in Realität auftretenden Verformung dar. Die maximale totale Verformung, die sich ergibt, beträgt $3.7\text{ }\mu\text{m}$, die Verformung senkrecht zur Bewegungsrichtung des Stempels ist mit $0.9\text{ }\mu\text{m}$ sehr gering.

Für das Ventil wurde mit AutoCAD Inventor gemäß den Geometrievorgaben der Simulink Simulation ein 3D Modell erstellt (siehe Abb. F2). Im Unterschied zur Simulationsgeometrie wurde das Kompressionsvolumen in das Löschgaskompressionsvolumen eingebracht. Durch diese Umsetzung ist es möglich, das Gewicht des Stempels zu reduzieren, da der Schaft verkürzt wird. Dies sollte sich als vorteilhaft erweisen, da die benötigten Kräfte, um das Ventil zu öffnen und die auftretenden Kräfte beim Schließen des Ventils verringert werden. Da eine Restriktion bezüglich der Dimensionierung des Ventils besteht, bietet dieser Aufbau die Möglichkeit, den Großteil der 15 l Löschgaskompressionsvolumen zu speichern. Die Form des Ventiltanks ist auf hohe Stabilität gegenüber Druckkräften ausgelegt. Falls aus Stabilitätsgründen erforderlich, könnten zusätzlich Verbindungsstege zwischen Kompressionskammer und Ventiltank eingebracht werden. Aufgrund des hohen Druckes des Löschgases und der Materialrestriktionen für ITER konnte kein Standarddichtungskonzept zwischen Löschgaskompressionsvolumen und Systemvolumen verwendet werden. Es bestehen zwei Dichtungsvorschläge, die aber noch auf ihre Umsetzbarkeit geprüft werden müssen. Der erste Vorschlag bedient sich eines metallischen Rings, um die Ventilöffnung zu verschließen. Als Material für den Ring wird eine Kupfer-Beryllium-Legierung empfohlen, wie sie für Federn benutzt wird. Hierbei wird durch eine leichte Verformung des Rings die Dichtung des Ventils sichergestellt. Der zweite Vorschlag benötigt eine scharfe Kante am Fuß des Stempels. Diese Kante fügt sich passgenau in eine Öffnung am Boden des Löschgaskompressionsbehälters ein. In der Vertiefung befindet sich zur Abdichtung ein Weichmetall (z.B. Zinn).

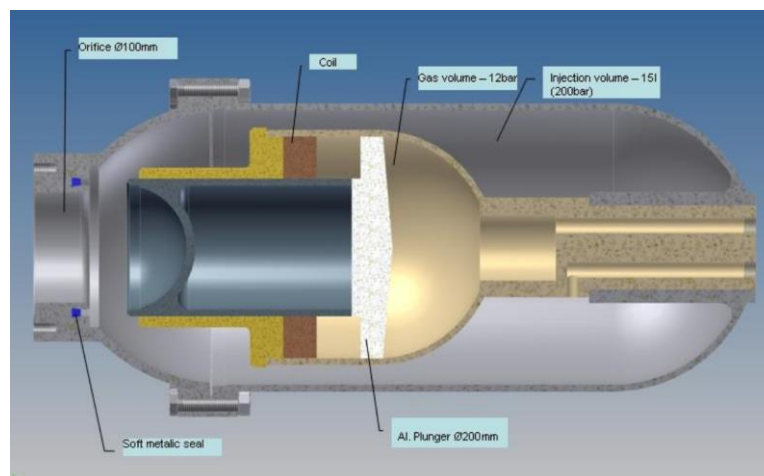


Abb. F2: Modell des ITER DMV

Die Konzeptstudie weist auf die kritischen Elemente im Design des Ventils hin (Dichtungen, Antrieb und Kräfte, Schließvorgang) und erläutert die Zusammenhänge der verschiedenen Parameter. Ohne eine erprobte Lösung dieser Probleme kann eine Konstruktion und Fertigung des Prototypen noch nicht in Angriff genommen werden.

Die anhand der Konzeptstudie herausgearbeiteten Probleme erforderten eine erneute

gründliche Analyse der denkbaren Möglichkeiten, die für ITER geforderte Gasmenge mit Hilfe eines schnellen Ventils in möglichst kurzer Zeit in das Plasmavolumen einzubringen. Alle bisherigen Arbeiten basieren im Wesentlichen auf dem Design der für TEXTOR entwickelten Ventile und sind einerseits in ihren Dimensionen an die für ITER benötigte Gasmenge angepasst worden. Andererseits wurde im Hinblick auf die verlangte Tritiumkompatibilität die Auswahl der verwendbaren Dichtungsmaterialien stark eingeschränkt. Die im Bericht der Firma vorgeschlagenen Lösungen sind wahrscheinlich beide in der Lage, die geforderte Tritiumdichtheit sowie die Abdichtung des Vorratsbehälters gegenüber dem Hochvakuum der Plasmakammer zu leisten. Allerdings gibt es keinerlei Erfahrungswerte, ob die modellierten hohen Schließgeschwindigkeiten mit einem Dauerbetrieb der Dichtung kompatibel sind. So basiert z.B. das im Bericht erwähnte CF-Dichtungsverfahren auf einer plastischen Verformung des Dichtrings, was bei einem periodischen Betrieb des Ventils die Zahl der möglichen Zyklen zu stark reduzieren könnte. Des Weiteren führen, wie auch im Bericht vermerkt, die hohen Schließgeschwindigkeiten zu derzeit noch nicht quantitativ behandelten Einwirkungen auf das Gesamtsystem. Die hohe Masse des Dichtstempels in Verbindung mit der geforderten extrem kurzen Öffnungszeit erfordert einen sehr hohen Kraftstoß. Hier ergibt sich zum einen das Problem der Impulseinwirkung auf den Flansch der Plasmakammer, zum anderen zeigen Abschätzungen, dass die benötigte Spannung zum Betrieb der Beschleunigungsspule extrem hoch ist und unter Umständen in Bezug auf die benötigte Isolation zu Problemen führen könnte.

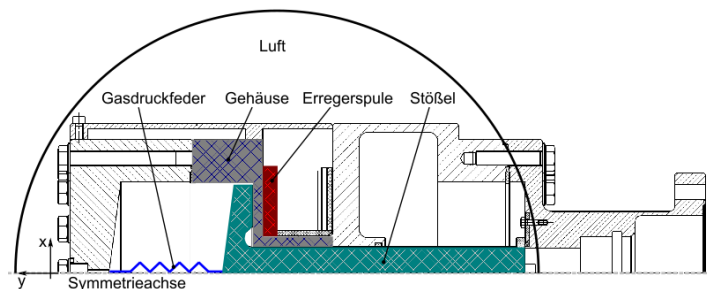


Abb. F3: Modellerte Bauteile des DMV-30

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden zwei Finite-Elemente-Modelle des schnellen Ventils mit Wirbelstromantrieb aufgestellt und berechnet (siehe Abb. F3). Das erste FE-Modell diente zur Analyse der elektromagnetischen Parameter, das zweite elektromagnetisch-mechanische FE-Modell zur Analyse des transienten Verhaltens des gekoppelten Systems. Mit dem elektromagnetischen FE-Modell wurden die induzierte Stromdichte und der magnetische Druck bezüglich Optimierungsmöglichkeiten analysiert, wobei sich zeigte, dass im System zum einen über Abänderungen des Edelstahlgehäuses zum Feldformer die Dämpfungseigenschaften eliminiert werden können und zum anderen über Variation der Induktivität oder der Kapazität das Gesamtsystem bezüglich des magnetischen Drucks auf den Stempel optimal ausgelegt werden kann. Das gekoppelte elektromagnetisch-mechanische Modell wurde mit den Daten des bestehenden Ventils verglichen und dabei hat sich herausgestellt, dass das transiente Verhalten des Modells dem Verhalten des an TEXTOR eingesetzten Ventils⁶³ entspricht. Damit ist ein Modell entstanden, das für weitere Optimierungen, Auslegungen bezüglich der Materialgrenzen und für das Studieren der Anwendung in starken Magnetfeldern zur Verfügung steht.

63 Das Ventil wird entsprechend dem Durchmesser der Injektionsöffnung als DMV-30 bezeichnet.

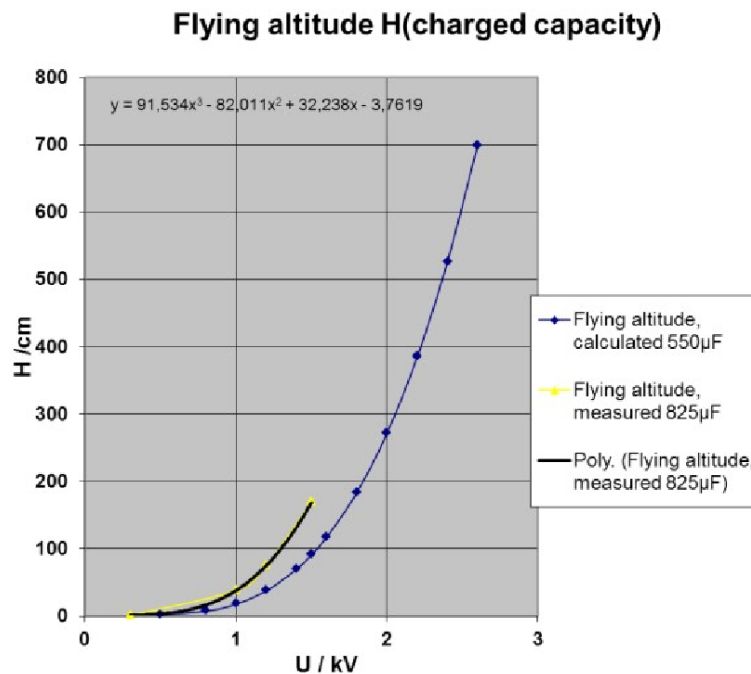


Abb. F4: Messung der Antriebskraft über die Flughöhe der Antriebsscheibe. Variation der Kondensatorspannung.

WIRBELSTROMANTRIEB - Die Kraftübermittlung des Stoßelantriebs wurde durch Flughöhenversuche ermittelt. Hierbei wurde eine Kupferscheibe durch Gewichte beschwert, auf eine Spulenordnung gelegt und die Flughöhe als Maß für den Kraftstoß nach Entladung der Kondensatorbank gemessen. Variiert wurden die Windungszahl der Spule sowie Kondensatorkapazität und Spannung (Abb. F4). Die Flughöhe und damit die aufgebrachte Kraft zeigen eine quadratische Abhängigkeit von der Spannung und eine schwächere Abhängigkeit von der Kondensatorkapazität. Die übertragene Kraft hängt auch vom zeitlichen Verlauf des Strompulses ab. Dazu wurden Spulen mit unterschiedlicher Windungszahl getestet. Wird das Maximum des Strompulses zu spät erreicht, sinkt die Effizienz der Kraftübertragung. Der Einfluss der Dicke der Edelstahlwand zwischen Antriebsspule und Ventilscheibe wurde bei diesen Tests berücksichtigt, indem eine 5 mm starke Stahlplatte über der Spule fixiert wurde. Die minimale Wandstärke dieser Platte ist bestimmt durch die notwendige mechanische Stabilität bei einer Druckbeaufschlagung von bis zu 100 bar und durch die elektrische Leitfähigkeit.

Durch weitere Optimierung der Induktivität der Antriebsspule wurde die kürzest mögliche Öffnungszeit bestimmt. Mit diesen Parametern kann das Ventil innerhalb von 2.2 ms geöffnet werden. Der Strom erreicht bei diesen Einstellungen sein Maximum bereits nach 0.5 ms. Die maximale Spannung an der Spule beträgt ca 2.6 kV und liegt damit in einem Bereich, der für die Isolierung noch keine besonderen Probleme bereiten sollte. Die experimentellen Ergebnisse der *Flugversuche* sind in guter Übereinstimmung mit einem einfachen Modell.

KOPFDICHTUNG - Zur Abdichtung des Hochdruckvolumens (bis zu 100 bar Helium) zum Plasmavakuum wurde folgendes Dichtungsverfahren entwickelt. Ein konischer Zylinder aus Polyimid wird in eine Bohrung mit elliptisch geformter Randkontur eingepresst. Für den Hochdrucktest der Polyimid-Kopfdichtung wurde ein Testaufbau erstellt (Abb. F5). Die Einzelheiten der Versuchskomponenten sind wie folgt:

- Konizität: 1:11,4
- Winkel: 5°
- Reibzahl 0,08, keine Selbsthemmung
- Material:
 - Dichtkopf: Polyimid TECASINT 2391
 - Bohrung: Edelstahl 1.4429
- Oberflächen: poliert

Der Polyimid-Zylinder wird durch einen Pneumatik-Zylinder mit einer Kraft von 200 N/bar und einem Pressdruck von 1 bis 10 bar in die Dichtung gepresst.

Nr	Schließdruck	He-Druck	Leckrate	Anpresskraft
	bar	bar	mbar.l/s	N
1	4	1	$3,3 \cdot 10^{-7}$	800
2	8	1	$3,2 \cdot 10^{-7}$	1600
3	8	53	$4,2 \cdot 10^{-7}$	1600
4	8	73	$4,6 \cdot 10^{-7}$	1600
5	8	100	$6 \cdot 10^{-7}$	1600
6	9,5	100	$5,6 \cdot 10^{-7}$	1900

Tabelle T7: Leckrate in Abhängigkeit von He-Druck und Schließdruck

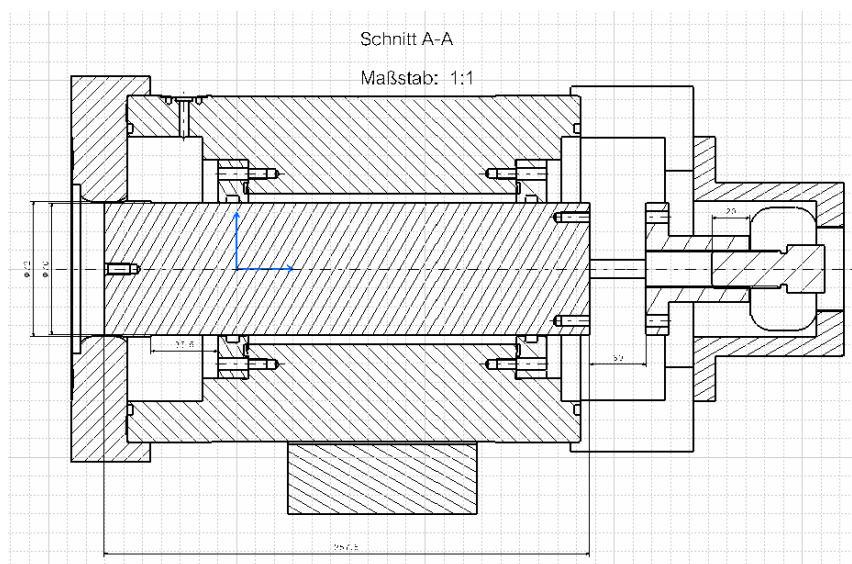


Abb. F5: Testaufbau zum Lecktest der Kopfdichtung

Zwei O-Ringe dichten den Zylinder und dienen gleichzeitig als Lagerung. Variiert wurde der Anpressdruck des Pneumatikzylinders und der Heliumgasdruck (Hochdruck) im Injektionsvolumen. Gemessen wurde die Helium-Leckrate auf der Vakuumseite der Kopfdichtung. Im ersten Versuch mit Schaft-Führung durch zwei O-Ring-Dichtungen wurde die angestrebte Leckrate von $<10^{-6}$ mbarl/s nicht erreicht. Die Zwangsführung des Schaftes verhindert die gleichmäßige Druckverteilung am Dichtkopf, was eine erhöhte Leckrate zur Folge hat. Im zweiten Versuch wurde ein O-Ring entfernt und der Schaft nur durch eine O-Ring-Dichtung geführt, hierdurch ist eine Zentrierung des Kopfes möglich. Bei Atmosphärendruck ist der Dichtkopf ab einer Anpresskraft von 600 N dicht. Der erforderliche Anpressdruck für eine zuverlässige Vakuumdichtigkeit (Leckrate $<10^{-6}$ mbarl/s) wird bei einem Druck >4 bar erreicht. In weiteren Versuchen wurde die Leckrate in Abhängigkeit vom Heliumgasdruck und Anpressdruck bestimmt (s. Tab. T7). Um mit dem Kopf Helium mit einem Druck von 100 bar abzudichten, ist ein Anpressdruck von 8 bar (entspricht einer Kraft von 1,6 kN) erforderlich. Drei Versuchsreihen mit jeweils 50 Betätigungen mit einem Schließdruck von 4 bar bzw. 8 bar führten stets zum gleichen Ergebnis.

STÖSSELDICHTUNG – Der Ventilschaft wurde aus Titan gefertigt und die radialen Dichtringe (welche auch als Lager für die axiale Bewegung des Ventilstößels dienen) wurden aus Terasint® hergestellt. Da die Dichtringe die Druckdifferenz zwischen dem Vorratsvolumen (~100 bar) und dem Antriebsvolumen (~1 bar) aufrechterhalten müssen, sind entsprechend kleine Toleranzen notwendig. Da die Oberfläche des Titanschafts zu weich ist, wurde der Ventilschaft bei einer Fachfirma durch Aufdampfen einer Legierung gehärtet und danach auf Maß geschliffen.

Für die Tests der radialen Dichtungen wurde ein Testaufbau erstellt, der es erlaubt, die Leckrate beider Dichtungen gemeinsam sowie die Leckraten jeder einzelnen Dichtung zu bestimmen. Dieser Testaufbau besteht aus einem Ventilkörper mit den radialen Lagern/Dichtungen und einem gepumpten Volumen an einer Seite. An der anderen Seite befindet sich eine Schraube, mit der der Ventilschaft langsam verfahren werden kann. Dies erlaubt mittels zwischengeschalteter Druckmessdose die Bestimmung der Reibungskraft und daher der minimalen Antriebskraft. Es zeigt sich, dass die zum Bewegen des Stempels notwendige Kraft lediglich 1/10 der in den Antriebsversuchen ermittelten Wirbelstromkraft beträgt.

Zur Bestimmung der Dichtigkeit wurden mehrere Sätze radialer Dichtungen mit unterschiedlichen Formen und verschiedenen Toleranzen gefertigt. Erste Ergebnisse mit trapezförmiger Dichtungsfläche zeigen allerdings eine deutliche Leckrate im Bereich von 10^{-4} mbar/s⁻¹. Dies ist ein recht hoher Wert, allerdings zeigen Abschätzungen, dass eine ausreichende Dichtigkeit durch Pumpen des Raums zwischen den Dichtringen erlangt werden kann. Nachteilig ist hierbei, dass ständig Gas anfällt, das bei ITER in das Gasaufbereitungssystem geleitet werden muss. Es wurden verschiedene Dichtlippenformen (Trapezform und halbrunde Formen) mit unterschiedlichen Presssitzdurchmessern getestet. Alle getesteten Formen und Durchmesser der Radikaldichtungen brachten nicht die angestrebte Leckrate von $<10^{-6}$ mbar/s. Die angestrebte Leckrate scheint nur mit sehr großem Aufwand erreichbar, deshalb wurde diese Entwicklung aufgegeben und als Alternative die Dichtung mit einem Metallbalg untersucht.

METALLBALG – Metallbälge, die für Differenzdrücke im Bereich 80 - 110 bar spezifiziert sind, können routinemäßig von Firmen hergestellt werden. Derartige Bälge haben nur eine geringe Dehnbarkeit und müssen zum Erreichen der optimalen Ventilöffnung relativ lang sein. Beim Einsatz in einem schnellen Ventil ist ein Ende des Balgs am Stößel befestigt und wird bei Auslösen des Ventils mit einer Beschleunigung von bis zu 500 g angetrieben. Für diese schnellen Kompressionen eines Metallbalgs gibt es keine Erfahrungswerte. Es wird aber als sehr kritisch angesehen, da nicht auszuschließen ist, dass der Metallbalg nicht gleichmäßig komprimiert wird und lokale Überlastungen auftreten. Die hohe Beschleunigung kann zur Zerstörung des Balges führen bzw. die Lebensdauerzyklen drastisch reduzieren. Da unter diesen Betriebsbedingungen plastische Verformungen zu erwarten sind, waren Tests notwendig, um quantitative Aussagen über die Lebensdauer des Balges als Funktion von Hub und Beschleunigung zu erhalten. Mit dem nachfolgend beschriebenen Versuch (Abb. F6) soll die schnelle Kompression eines geeigneten Metallbalgs experimentell untersucht werden. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Antriebsteller mit Stößel, einer Antriebsspule und einem Metallbalg. Der Hub kann mittels Distanzscheiben begrenzt werden. Die Beschleunigung ist über Versorgungsspannung, Spulenwindungszahl und Kondensatorkapazität einstellbar.

Einzelheiten des Versuchsaufbaus:

- Kräfte für die Auslegung des Versuchsaufbaus
 - Beschleunigungskraft: bis zu ca 30 kN
 - Rückwirkung auf Gestell: 30 kN
 - Bremskraft: ca 20 kN
- Antrieb:
 - Es wird der elektromagnetische Antrieb (wie beim Freiflugtests) verwendet
 - Windungszahl: 40 – 80 Windung
- Energieversorgung
 - $U = 2600 \text{ V}$
 - $I = 4 \text{ kA}$
 - Kondensatorbank 1075 μF , 3 kV
 - Thyristorschalter 10 kA
- Bremse
 - 24 Gummipuffer, 12 parallel, 2 hintereinander, werden als Bremsen verwendet
 - Die Dämpfungsglieder nehmen 50% der Stoßenergie auf
- Messsysteme
 - Laser-Wegmessung
 - Schnelle Kamera (bis zu 20000 Bilder/s)
- Die folgenden Messdaten sollen erfasst werden
 - Strom $I = F(t)$
 - Spannung $U = F(t)$
 - Weg $x = F(t)$
 - Balgwellenbewegung mittels schneller Kamera

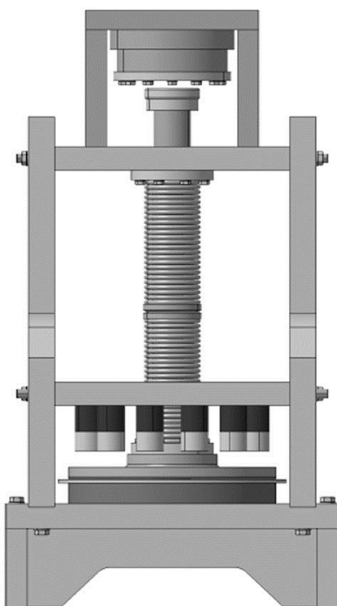


Abb. F5: Testaufbau zur schnellen Kompression eines Metallbalgs

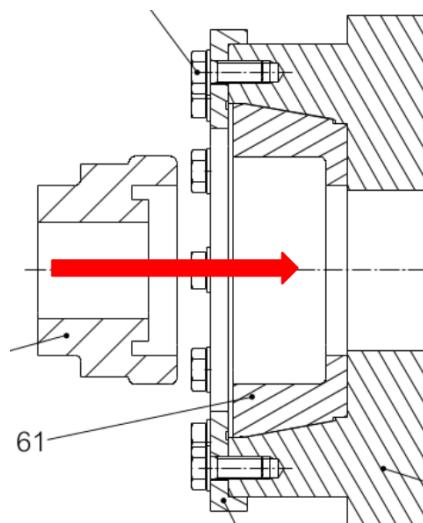


Abb. F7: Bremseinrichtung für den Ventilstößel

Der Metallbalg besteht aus zwei Stücken, die miteinander verschweißt sind, da ein Balg für 110 bar in der benötigten Länge nicht lieferbar ist. Vor Beginn der Tests und in

unregelmäßigen Abständen (nach 50, 200, 2500 Betätigungen) wurde der Balg einem Helium-Lecktest unterzogen. Die Lebensdauertests wurden mit einer Betriebsspannung von 2000 V durchgeführt. Die Öffnungszeit des Ventils beträgt unter diesen Bedingungen 3,5 ms.

Es zeigte sich bei den Versuchen allerdings, dass die extrem schnelle Stauchung durch den Wirbelstromantrieb zur Ausbreitung von transversalen Kompressionswellen entlang des Balges führt. Hierbei entstehen lokal größere Stauchungen und Dehnungen der einzelnen Wellen, als im Mittel für die erforderliche Längenänderung notwendig sind. Dieses Verhalten führt schon nach wenigen Versuchen (ca. 50) zu plastischen Verformungen, d.h. einige Wellen bleiben dauerhaft gedehnt und andere gestaucht. Positiv ist allerdings, dass sich im weiteren Verlauf der Testserie diese plastischen Verformungen nicht mehr verändern.

Die Anzahl der Versuche zwischen zwei Dichtheitstests wurden stetig erhöht (50, 100, 200, 500, 1000, 2500 und 5000). Nach 2500 Zyklen war der Balg noch dicht, nach weiteren 2500 Zyklen, insgesamt also 5000 Zyklen, wurde eine Undichtigkeit des Balgs festgestellt. Diese Test wurden mit höchster Antriebs-Spannung (2,6 kV) und kleinster Windungszahl ($w=40$), d.h. kurzer Kraftstoß und größte Kraft (50 kN) durchgeführt. Diese Auslegung wurde gewählt, um die Grenzbelastung des Balgs zu ermitteln. Weitere Untersuchungsgegenstände waren: (i) Der Einfluss des massebehafteten Verbindungsringes zwischen den Bälgen, der zum Zusammenschweißen benötigt wird, (ii) Messung der Druckkräfte zwischen den Balgwellen im Dauerversuch und (iii) Dokumentation der Balgbewegungen, Wellendeformationen, Balg-schwingungen, Wellenkontakte, Schwingungsdauer und Schwingungsanzahl mit einer schnellen Kamera (20000 Bilder/Sek.). Die experimentell ermittelten Werte aus (i) bis (iii) konnten durch Berechnung der mechanischen Spannungen, der Dauerfestigkeit sowie durch FE-Simulationen hinreichend quantitativ verifiziert werden.

Der Einfluss der Balg-Außendruckbelastung von 100 bar kann nur in einem funktionierenden Prototyp getestet werden.

BREMSVORRICHTUNG - Aufgrund der besonderen Konstruktion der Kopfdichtung kann ein automatisches Schließen, wie es bei allen bisher in Jülich konstruierten und gebauten Ventilen angewendet wird, nicht durchgeführt werden. Der Schließmechanismus der bisher gebauten Ventile beruht entweder auf Gasdruck oder auf Federkraft. In beiden Fällen wird der Stößel mit relativ hoher Geschwindigkeit und Kraft in die Ausgangslage zurückgebracht. Beim ITER-Ventil ist eine Beschädigung der Kopfdichtung nicht auszuschließen, daher wird eine andere Strategie verfolgt. Nach Betätigung soll der Ventilstößel abgebremst werden und in geöffneter Stellung verbleiben, bis das Ventil durch einen Pneumatikzylinder und eine Schubstange wieder geschlossen wird. Aufgrund der relativ langen Zeit zwischen zwei ITER-Entladungen stellt dies keine Einschränkung des Betriebs dar.

Eine entsprechende Bremsvorrichtung wurde konstruiert und gebaut. Abbildung F7 zeigt die prinzipielle Funktion. Ein am Ende des Stöpsels angebrachtes Aluminiumdrehteil dringt beim Öffnen des Ventils formschlüssig und unter mechanischer Spannung in ein Gegenstück aus Sintimid (Teil 61 in Abb. F7), welches sich in einer Aufnahme aus Edelstahl befindet. Durchmesser und Keilwinkel wurden berechnet und sind so ausgelegt, dass einerseits genügend Reibung vorhanden ist, um den beschleunigten Stößel sicher abzubremsen, andererseits soll das erneute Schließen des Ventils mit deutlich geringerer Kraft möglich sein.

Die Bremse wurde in den Testaufbau Abb. F6 integriert und getestet. Die mechanische Funktion ist wie erwartet. Der Ventilstößel wird sicher abgebremst und gegen die Federkraft des gedehnten Metallbalgs sicher festgehalten.

LAVALDÜSE - Zur Optimierung der Ausströmgeschwindigkeit und Maximierung des Massendurchsatzes bei Schallgeschwindigkeit wurde der Ventilausgang nach Art einer Lavaldüse gestaltet (s. Abb. F8).

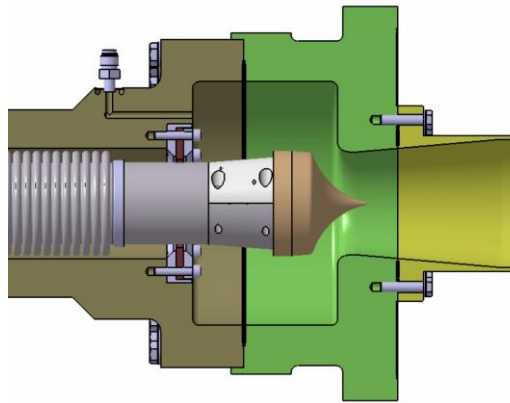


Abb. F8: Lavaldüse zur Optimierung der Gasströmung

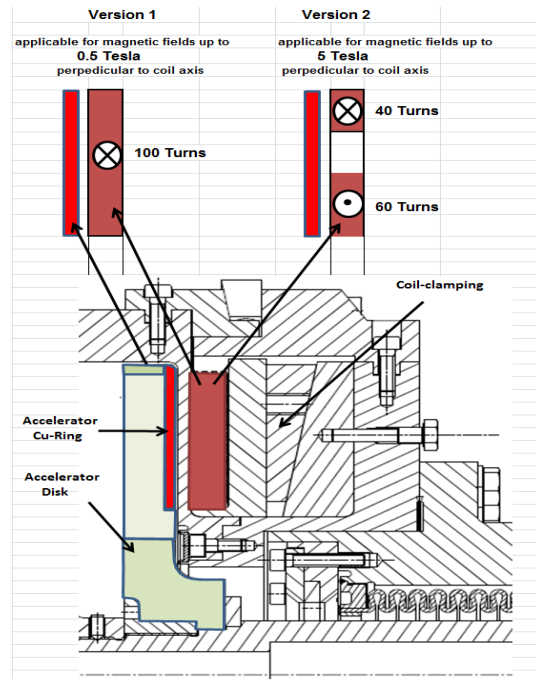


Abb. F9: Spulenaufbau mit Kompensation der Kräfte.

GASFLUSS - Das Modell, welches bisher den Druckaufbau im Ausgangsrohr vernachlässigte, wurde verfeinert und berechnet jetzt die Gasströmung unter Berücksichtigung des im Ausgangsrohr entstehenden Staudrucks. Mit dem Modell war es möglich, die im Laborversuch ermittelten Gasflussmessungen⁶⁴ an einem für TEXTOR konstruierten Ventil zu reproduzieren. Die Ergebnisse der Berechnungen für das ITER-Ventil lassen sich wie folgt zusammenfassen: Für das Arbeitsgas Argon und ein Ausgangsrohr mit 100 mm innerem Durchmesser bleibt der Staudruck im Rohr immer unter dem Druck am Ausgang der Lavaldüse. Damit ist sichergestellt, dass die Strömung im Überschallbereich liegt und kein Geschwindigkeitsabfall durch einen Verdichtungsstoß eintritt. Die Berechnungen zeigen, dass mehr als 50% des Gasinventars innerhalb von 5 ms ausgeströmt sind und 90% nach ca 12 ms erreicht werden. Abhängig von der Länge des an ITER benutzten Rohres, d.h. der Einbauposition des Ventils, muss noch die Laufzeit im Rohr zu diesen Zeiten addiert werden. Sollte eine möglichst kurze Reaktionszeit verlangt werden, muss das DMV möglichst nah am Plasma eingebaut werden. Hier ist das Magnetfeld stärker und es entstehen Kippkräfte auf den Antriebsteiler.

KOMPENSIERTE SPULE - Soll das DMV innerhalb der Toroidalfeldspulen betrieben werden, müssen die auf den Antriebsteiler wirkenden Kippkräfte berücksichtigt werden. Hierzu gibt es Erfahrungswerte von einem (kleineren) an TEXTOR betriebenen Ventil, welches ebenfalls einen Wirbelstromantrieb benutzte. Magnetfelder von 2 T hatten auf die Ventulfunktion keinen negativen Einfluss. Allerdings ist das Magnetfeld an ITER deutlich größer und das Kippmoment auf den Antrieb des ITER-DMV, auch aufgrund des größeren Durchmessers und höheren Stroms, deutlich erhöht. Deutlich verringerte Kräfte können durch einen kompensierten Aufbau der Antriebsspule (Abb. F9) erreicht werden. Die Antriebsspule wird in zwei konzentrische Spulen aufgeteilt. Der Strom in beiden Spulen fließt gegenläufig. Das Verhältnis der Windungszahlen, die Spulendicke und der Spulenabstand wurden mittels FE-Berechnungen optimiert. Berechnungen zeigen, dass für gleiche Antriebskraft der Strom ca 60% größer sein muss. Das Kippmoment auf den Antrieb wird allerdings effektiv auf weniger als 10% verringert. Mit der geteilten, gegenläufigen Spulenanordnung ist ein Betrieb des Ventils in einem Magnetfeld von 5 T möglich.

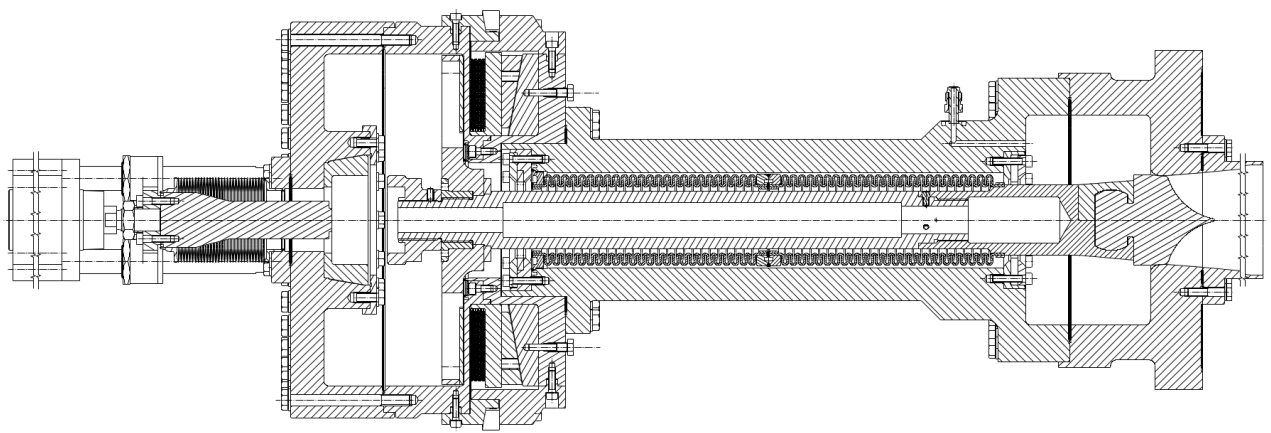


Abb. F10: Schnittzeichnung des ITER-Prototypen mit allen bisher entwickelten Detaillösungen

PROTOTYP – Unter Berücksichtigung der gefundenen Detaillösungen für den Antrieb, die Dichtung des Injektionsvolumens, die Balgdichtung des Stößels, die Bremsvorrichtung und die Lavaldüse ließ sich nun ein Prototyp konstruieren. Die vom Ventil zu injizierende Gasmenge wurde entsprechend der ITER-Anforderungen⁶⁵ auf $22,5 \text{ kPam}^3$ festgelegt. Die Gasart und die Einbautenfernung vom Plasma sind noch nicht endgültig bestimmt. Aufgrund der durch das Projekt gewonnenen Erfahrung und der entwickelten Modelle lassen sich (nach Festlegung der erforderlichen Betriebsparameter (durch ITER) wie Druck, Volumen, Gasart, Ansprechzeit und Betriebszyklen) notwendige Anpassungen mit geringem Aufwand durchführen und dadurch den Testaufwand wesentlich verringern.

Die Festigkeitsnachweise für alle Einzelteile einschließlich Schweiß- und Schraubverbindungen wurden erstellt. Die Auslegungsparameter sind:

- Prüfdruck: 140 bar
- Betriebsdruck: 100 bar
- Beschleunigungskraft: 50 kN
- Kipp-Moment Spule: 6 kNm
- Kipp-Moment Cu-Ring 3,8 kNm

Alle bisherigen Test- und Berechnungsergebnisse wurden in die Konstruktion eines Prototypen eingearbeitet. Die Festigkeitsnachweise wurden erstellt und auch ein kompletter Satz ausschreibungsreifer Einzelteilzeichnungen für die Fertigung des gesamten Prototyps (s. Abb. F10).

⁶⁵ ITER Dokument BEJQWA V1.2, S. 15: Die gesamte Gasmenge soll 90 kPam^3 betragen. Da zurzeit vier Positionen für diese Systeme vorgesehen sind, wird $\frac{1}{4}$ dieses Werts als Designwert gewählt.

2. Veröffentlichungen der Ergebnisse

- G. Czymek et al., „Development of an ITER prototype disruption mitigation valve“, Fusion Engineering and Design, im Druck (2015)
- H. R. Koslowski, „Abschwächung von Disruptionen in Tokamakplasmen durch massive Gasinjektion“, Hauptvortrag auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Bochum (2015)
- G. Fuchs, „Elektromagnetische FEM-Analyse eines schnellen wirbelstromgetriebenen Gasventils“ Masterarbeit FH Aachen (2012)
- M. Lehnen et al., “Disruption mitigation by massive gas injection in JET”, Nucl. Fusion **51** 123010 (2011)
- K. H. Finken, et al., “A new Disruption Mitigation Valve (DMV) and gas flow in guiding tubes of different diameter”, Nucl. Fusion **51** 033007 (2011)
- S. A. Bozhenkov et al., “Fuelling efficiency of massive gas injection in TEXTOR. Mass scaling and importance of gas flow dynamics”, Nucl. Fusion **51** 083033 (2011)
- M. Lehnen et al., “First experiments on massive gas injection at JET - consequences for disruption mitigation in JET and ITER”, 36th EPS Conference on Plasma Phys., Sofia, ECA, **33E**, O-2.001 (2009)
- S. A. Bozhenkov et al., ” Efficiency of massive gas injection for increase of plasma density in TEXTOR experiments on disruption mitigation.”, 36th EPS Conference on Plasma Phys., Sofia, ECA, **33E**, P-1.180 (2009)

